



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**EFFECTOS DEL FENÓMENO “EL NIÑO” EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE
LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**

Andrea Ester Rodríguez Alvarado

Asesorado por el Ing. Claudio César Castañón Contreras

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTOS DEL FENÓMENO “EL NIÑO” EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE
LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ANDREA ESTER RODRÍGUEZ ALVARADO

ASESORADO POR EL ING. CLAUDIO CÉSAR CASTAÑÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EFFECTOS DEL FENÓMENO “EL NIÑO” EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 8 de mayo de 2017.


Andrea Ester Rodríguez Alvarado

Guatemala 30 de mayo 2018

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Coordinador, área de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería / USAC

Ingeniero Sandoval

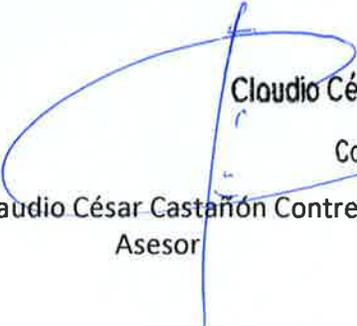
Estimado Ingeniero, me dirijo a usted deseándole éxitos en sus labores.

Por este medio me permito informarle que he asesorado al estudiante ANDREA ESTER RODRIGUEZ ALVARADO, quien se identifica con registro universitario (carnet) 201314372, en su trabajo de graduación que lleva por título EFECTOS DEL FENÓMENO DE "EL NIÑO" EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY.

Luego de haber propuesto correcciones y el estudiante haberlas realizado APRUEBO este trabajo de graduación para que el mismo sea sometido a su consideración y posteriormente a su aprobación final.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Claudio César Castañón Contreras
Asesor

Claudio César Castañón Contreras
Ingeniero Civil
Colegiado No. 5,629



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala, 25 de Julio de 2018

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **"EFECTOS DEL FENÓMENO "EL NIÑO" EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RIO CHIXOY"**, desarrollado por la estudiante de ingeniería civil Andrea Ester Rodríguez Alvarado, quien contó con la asesoría del ingeniero Claudio César Castañón Contreras.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el tramite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Jefe del Departamento de Hidráulica



Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Claudio César Castañón Contreras y Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación de la estudiante Andrea Ester Rodríguez Alvarado EFECTOS DEL FENÓMENO "EL NIÑO" EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2018

/mmm.



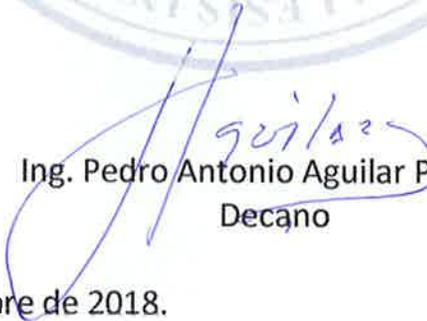
Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua



DTG. 459.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil al Trabajo de Graduación titulado: **"EFECTOS DEL FENÓMENO "EL NIÑO" EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**, presentado por la estudiante universitaria: **Andrea Ester Rodríguez Alvarado** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala noviembre de 2018.

/echm

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

El fin y la razón de mi vida.

Mis padres

Marcos y Sandra Rodríguez.

Mi hermana

Ingrid Rodríguez.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser escudo alrededor de mí; mi gloria, y el que levanta mi cabeza (Salmo 3:3).
Mis padres	Por trabajar arduamente y educarme con amor.
Mi hermana	Por tu apoyo y compañía, en todo momento.
Mi familia	Por su apoyo incondicional.
Mis amigos	Por los buenos momentos compartidos.
Mis catedráticos	Por impartir educación de calidad y compartir sus lecciones de vida.
Mi asesor	Ing. Claudio César Castañón Contreras, por su tiempo y dedicación.
Universidad San Carlos de Guatemala	Por mantener un estándar alto de enseñanza.
Pueblo de Guatemala	Por facilitar la oportunidad de que cualquier persona pueda desarrollar sus capacidades.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. FENÓMENO “EL NIÑO, OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS)”	1
1.1. Descripción del fenómeno	1
1.2. Antecedentes	5
1.3. Monitoreo	6
2. OBJETO DE ESTUDIO.....	11
2.1. Cuenca del río Chixoy hasta la presa de la hidroeléctrica Chixoy	11
2.1.1. Ubicación geográfica	11
2.1.2. Delimitación de la cuenca.....	12
2.1.3. Características morfométricas	14
2.1.4. Estaciones hidrométricas de la cuenca	15
3. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA	17
3.1. Tablas de contingencia	17
3.2. Prueba exacta de Fisher.....	18
3.3. Análisis de correlación	19
3.3.1. Correlación lineal	20

3.3.2.	Coeficiente de correlación	21
3.3.3.	Correlación múltiple	22
3.4.	Análisis de regresión.....	23
4.	VARIABLES DE ESTUDIO	25
4.1.	Cuenca del río Chixoy	25
4.1.1.	Precipitación	25
4.1.2.	Caudal.....	40
4.2.	Fenómeno El Niño	41
5.	RESULTADOS.....	43
5.1.	Precipitación	43
5.2.	Caudal.....	94
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	97
	CONCLUSIONES.....	105
	RECOMENDACIONES	109
	BIBLIOGRAFÍA.....	111
	APÉNDICES	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Interacción océano-atmósfera durante el ciclo ENOS	3
2.	Proceso resultante de la elevación en la temperatura del mar durante El Niño y La Niña	4
3.	Ubicación de las regiones El Niño	7
4.	Índice de la temperatura superficial del mar (TSM)	7
5.	Comportamiento anomalía ONI, período 1979-2016	8
6.	Comportamiento mensual IOS, período 1979-2016.....	9
7.	Mapa delimitación cuenca Chixoy	13
8.	Tabla de contingencia.....	17
9.	Tipos de correlación	21
10.	Correlación perfecta	21
11.	Ubicación de estaciones: precipitación	25
12.	Comportamiento mensual de la precipitación media sobre la cuenca, período 1979 - 2016	26
13.	Comportamiento mensual precipitación, estación Purulhá, período 1979 - 2016.....	27
14.	Comportamiento mensual precipitación, estación San Cristóbal, período 1979 - 2016	28
15.	Comportamiento mensual precipitación, estación Chicamán, período 1979 - 2016.....	29
16.	Comportamiento mensual precipitación, estación San Jerónimo, período 1979 - 2016	30

17.	Comportamiento mensual precipitación, estación Cubulco, período 1979 - 2016.....	31
18.	Comportamiento mensual precipitación, estación San Andrés, período 1979 - 2016	32
19.	Comportamiento mensual precipitación, estación Chuitín, período 1979 - 2016.....	33
20.	Comportamiento mensual precipitación, estación Nebaj, período 1979 - 2016.....	34
21.	Comportamiento mensual precipitación, estación El Paradillo, período 1979 - 2016	35
22.	Comportamiento mensual precipitación, estación Todos los Santos, período 1979 - 2016	36
23.	Comportamiento mensual precipitación, estación Huehuetenango, período 1979 - 2016	37
24.	Comportamiento mensual precipitación, estación Santa Cruz del Quiché, período 1979 - 2016.....	38
25.	Comportamiento mensual precipitación, estación Xequemeyá, período 1979 - 2016	39
26.	Comportamiento mensual precipitación, estación Totonicapán, período 1979 - 2016	40
27.	Comportamiento mensual del caudal sobre la cuenca del río, período enero 1984 – julio 2016	41
28.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, abril	47
29.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, abril.....	48
30.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, abril	49

31.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, mayo	52
32.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-neutral, mayo	53
33.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, mayo	54
34.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, junio	57
35.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, junio.....	58
36.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, junio	59
37.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, julio	62
38.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, julio	63
39.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, julio	64
40.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, agosto	67
41.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, agosto.....	68
42.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, agosto	69
43.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, septiembre	72
44.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, septiembre.....	73

45.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, septiembre	74
46.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, octubre	77
47.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-neutral, octubre.....	78
48.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, octubre	79
49.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, noviembre	82
50.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-neutral, noviembre	83
51.	Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, noviembre	84
52.	Gráfica de la probabilidad de ocurrencia de condiciones climáticas para precipitación media, según cada evento del ciclo ENOS	92
53.	Gráfica de la probabilidad de ocurrencia de condiciones climáticas para caudal, según cada evento del ciclo ENOS	95

TABLAS

I.	Coordenadas de inicio y fin del área de estudio	12
II.	Municipios colindantes.....	12
III.	Características morfométricas.....	14
IV.	Estaciones hidrométricas INDE para datos de precipitación	15
V.	Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, abril....	45
VI.	Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, mayo..	50
VII.	Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, junio ...	55
VIII.	Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, julio	60

IX.	Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, agosto	65
X.	Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, septiembre	70
XI.	Probabilidad de ocurrencia de ENSO-neutral para precipitación, octubre	75
XII.	Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, noviembre	80
XIII.	Correlación simple, precipitación.....	85
XIV.	Correlación múltiple sin rezago TSM e IOS, precipitación	86
XV.	Correlación múltiple un mes de rezago TSM e IOS, precipitación.....	87
XVI.	Correlación múltiple dos meses de rezago TSM e IOS, precipitación..	87
XVII.	Correlación múltiple tres meses de rezago TSM e IOS, precipitación.....	88
XVIII.	Modelos matemáticos para precipitación, con mayor correlación múltiple: tres meses de rezago TSM absoluta e IOS en región Niño 3	89
XIX.	Probabilidad de ocurrencia El Niño para precipitación media, cuenca del río Chixoy	90
XX.	Correlación simple, precipitación cuenca del río Chixoy.....	93
XXI.	Correlación múltiple, precipitación cuenca del río Chixoy.....	93
XXII.	Probabilidad de ocurrencia y prueba de Fisher para caudal, cuenca del río Chixoy	94
XXIII.	Correlación simple, caudal	96
XXIV.	Correlación múltiple TSM e IOS, caudal	96
XXV.	Resumen de resultados: El Niño condición seca	98
XXVI.	Resumen de resultados: El Niño condición normal.....	98
XXVII.	Resumen de resultados: El Niño condición lluviosa.....	99
XXVIII.	Resumen de resultados: La Niña condición seca	100

XXIX.	Resumen de resultados: La Niña condición normal.....	100
XXX.	Resumen de resultados: La Niña condición lluviosa.....	101

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a	Intercepto
b₁	Coeficiente de la variable X ₁
b₂	Coeficiente de la variable X ₂
C	Centígrados
km	Kilómetro
km²	Kilómetro cuadrado
n	Número de datos
P_{total}	Precipitación total
r	Coeficiente de correlación múltiple
X₁	Variable dependiente 1
X₂	Variable dependiente 2
Y₁	Variable independiente 1
Y₂	Variable independiente 2

GLOSARIO

Caudal	Cantidad de fluido que avanza por una sección en una unidad de tiempo.
Ciclo ENOS	Representa las dos fases del fenómeno oceánico-atmosférico; conformado por una fase cálida (“El Niño”) y una fría (“La Niña”) a lo largo del Pacífico tropical y en la atmósfera como una oscilación entre una fase negativa (“El Niño”) y una fase positiva (“La Niña”) de la Oscilación del Sur.
Confiabilidad	Se refiere al grado en la que se producen resultados consistentes al realizar mediciones repetidas.
Cuenca	Es una unidad de territorio que cuenta con un único drenaje natural, delimitado por una línea de cumbres llamada divisoria de aguas.
Embalse	Lugar donde es captada y se acumula el agua de manera natural o artificial para luego ser aprovechada su energía cinética.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
msnm	Metro sobre el nivel del mar.

NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration.</i>
Percentil	Es una medida de posición no central que indica el porcentaje de datos que son igual o menores al valor del percentil dado.
Precipitación	Fenómeno meteorológico por el cual el vapor de agua condensado en las nubes cae a tierra en forma de lluvia.
QGis	Sistema de información geográfica libre y de código abierto.
Significancia	Son niveles de probabilidad de cometer un error, o de equivocarse en la prueba de hipótesis o la estimación de parámetros. Los niveles más comunes son 0,05 y 0,01.
Teleconexiones	Es la existencia de interacciones entre las anomalías climáticas de dos zonas distantes entre sí.
Vientos alisios	Son vientos regulares y moderados, se encuentran a los 30° de latitud en dirección al ecuador, donde una parte de masa de aire retrocede de nuevo en dirección a la baja presión del ecuador en vez de proseguir hacia los polos.

RESUMEN

En este trabajo se determinan los efectos locales cuantitativos y cualitativos que son consecuencia de la ocurrencia del fenómeno de “El Niño, Oscilación del Sur (ENOS)” sobre los recursos hídricos de precipitación y caudal de la cuenca del río Chixoy que, consecuentemente, generan el embalse de la hidroeléctrica Chixoy.

Primero, se evalúan las condiciones climáticas que resultan de la ocurrencia de los eventos del ciclo ENOS para caracterizar localmente los efectos de estos eventos sobre la cuenca, por medio de probabilidades de ocurrencia y mapas que especifican las regiones que se verán más afectadas durante un evento del ciclo ENOS. Luego, se realiza un análisis de correlación para determinar el grado de teleconexión que presenta el fenómeno con las condiciones climáticas concluyendo con la región Niño con grado de asociación mayor a 0,5. Por último, se realiza un análisis de regresión para generar modelos matemáticos que evalúen estos efectos sobre la cuenca.

OBJETIVOS

General

Determinar los efectos del fenómeno “El Niño, Oscilación Sur (ENOS)”, en los recursos hídricos de la cuenca del río Chixoy.

Específicos

1. Determinar si existe relación entre el fenómeno “El Niño, Oscilación Sur (ENOS)” y las variaciones en los registros de precipitación y caudal del río Chixoy.
2. Correlacionar los índices que describen al fenómeno “El Niño, Oscilación Sur (ENOS)” con la precipitación en la cuenca del río Chixoy.
3. Correlacionar los índices que describen al fenómeno “El Niño, Oscilación Sur (ENOS)” con el caudal en la cuenca del río Chixoy.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno “El Niño, Oscilación Sur (ENOS)”, es la fase cálida del ciclo ENOS. Se caracteriza por el calentamiento de las aguas superficiales en la parte central y oriental del océano Pacífico, por la reducción de la velocidad de vientos alisios y por la disminución de la presión atmosférica a nivel del mar en la región oriental del Pacífico.

Su ocurrencia, ha generado a nivel mundial investigaciones que han comprobado que se produce una variabilidad significativa en los registros de precipitación y caudal debido a este fenómeno. En Guatemala, se han hecho previamente estudios generalizados a nivel nacional que describen cualitativamente el impacto que sobre todo el territorio tiene el fenómeno “El Niño, Oscilación del Sur (ENOS)”.

Por esta razón, se realizó este estudio cuantitativo que primeramente demostró la teleconexión entre el fenómeno y su impacto en las variaciones en los registros de precipitación y caudal. Luego, se generaron modelos matemáticos que evalúan su impacto sobre los recursos hídricos de la hidroeléctrica Chixoy. Al conocer el comportamiento del fenómeno, se ayudará a mejorar la planificación del recurso hídrico.

En el capítulo uno se describe y caracteriza el fenómeno “El Niño, Oscilación del Sur (ENOS)”; también se describen los antecedentes de la definición del fenómeno y se explica la forma utilizada para su monitoreo, definiendo los índices utilizados para la determinación de los eventos del ciclo ENOS y se proveen páginas web para obtener los datos de estos índices.

El segundo capítulo describe el objeto de estudio que es la cuenca del río Chixoy en términos de características morfométricas y ubicación geográfica para: su delimitación y la ubicación de las estaciones hidrométricas utilizadas. También, se definen las características más importantes de la hidroeléctrica Chixoy.

La metodología estadística utilizada, se describe en el capítulo tres. Se definen las herramientas estadísticas y sus restricciones, así como también las ecuaciones y la interpretación de cada una. Estas herramientas son: la tabla de contingencia, la prueba exacta de Fisher, el análisis de correlación y el análisis de regresión.

En el capítulo cuatro se definen las variables de estudio, separándolas en: dependientes que son las propias de la cuenca, es decir, precipitación y caudal; e independientes, que son el componente atmosférico y el componente oceánico del fenómeno “El Niño”.

Los resultados se presentan en tablas en el capítulo cinco, tanto del análisis realizado para las estaciones individuales y para el promedio de datos de precipitación como para los datos de caudal, se define el período de estudio y se describen los resultados obtenidos más relevantes. También se presentan mapas de precipitación que ubican las áreas más afectadas sobre la cuenca durante la ocurrencia de los eventos del ciclo ENOS, y se presentan los modelos de precipitación y caudal para las correlaciones mayores a 0,5.

Los resultados se discuten en el capítulo seis, resaltando las implicaciones que se esperan sobre la cuenca durante la ocurrencia de cada evento del ciclo ENOS, con base a los resultados obtenidos.

1. FENÓMENO “EL NIÑO, OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS)”

1.1. Descripción del fenómeno

El fenómeno “El Niño, Oscilación Sur (ENOS)”, es un fenómeno de interacción océano-atmosférica que está representado por: una fase cálida llamada “El Niño” y una fase fría conocida como “La Niña”. El fenómeno tiene dos componentes: “El Niño” que es la parte oceánica del fenómeno y la parte atmosférica es la “Oscilación Sur”.

“El Niño” tiene una duración de nueve a doce meses. En promedio ocurre cada cuatro años, aunque el registro histórico ha demostrado que los períodos de ocurrencia han oscilado entre dos y siete años, y puede llegar a repetirse durante dos años consecutivos. Su formación se inicia entre junio y agosto, alcanzando su intensidad máxima entre diciembre y abril, finalmente regresa a condiciones neutras ente mayo y junio del siguiente año. ¹

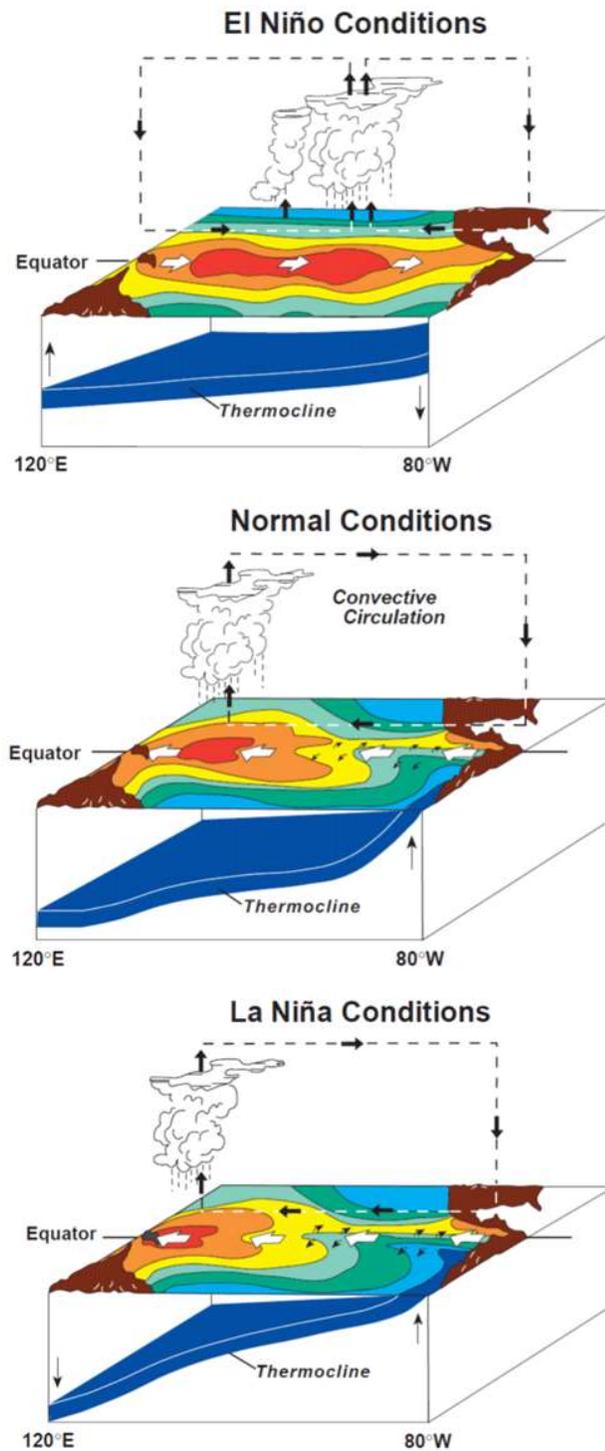
Se caracteriza por el calentamiento de las aguas superficiales en la parte central y oriental del océano Pacífico; por la reducción de la velocidad de vientos alisios, es decir, los vientos a baja altitud que soplan hacia el Noroeste; y por la disminución de la presión atmosférica a nivel del mar en la región oriental del Pacífico. Durante “El Niño”, el aumento resultante en las temperaturas marinas calienta y humedece la atmósfera, alterando la convección de modo que las

¹ DOBIAS, Jonas. *El fenómeno “El Niño” y su impacto en la generación hidroeléctrica de Chixoy*. <http://www.cnee.gob.gt/wp/?p=2027>. Consulta: 10 de marzo de 2017.

zonas de convergencia y las lluvias asociadas se desplazan a otros lugares originando, a su vez, perturbaciones en la circulación atmosférica.²

² CEPREDENAC. *El fenómeno El Niño 1997-98 en Guatemala*.
<http://www.bvsde.paho.org/texcom/cd046995/LHerrera.pdf>. Consulta:
15 de mayo de 2017.

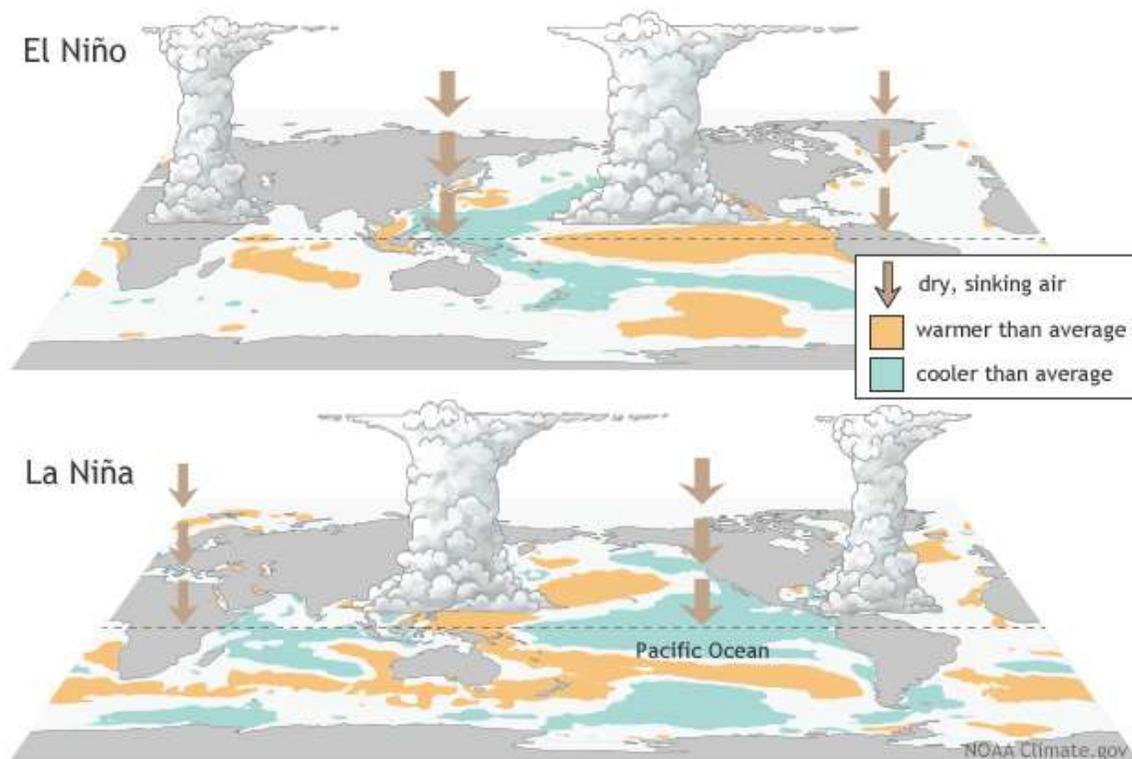
Figura 1. Interacción océano-atmósfera durante el ciclo ENOS



Fuente: Reef Resilience Network. <http://www.reefresilience.org/coral-reefs/stressors/climate-and-ocean-change/el-nino-southern-oscillation/>. Consulta: 24 de mayo de 2018.

“La Niña” representa la fase fría del ciclo ENOS. Se refiere al enfriamiento periódico de las temperaturas superficiales del mar en el océano Pacífico ecuatorial central y este-central, y se produce aproximadamente cada 3 a 5 años. Globalmente el impacto de “La Niña” tiende a ser opuesto al de “El Niño”.

Figura 2. **Proceso resultante de la elevación en la temperatura del mar durante El Niño y La Niña**



Fuente: Cleveland.com.

https://www.cleveland.com/weather/blog/index.ssf/2017/09/la_nina_watch_in_effect_55-60.html.

Consulta: 29 de mayo de 2018.

1.2. Antecedentes

El término “El Niño” fue originalmente utilizado por los pescadores de la costa de Perú para referirse a la corriente inusualmente cálida del océano, que ocurría en Navidad y duraba varios meses; la pesca disminuía considerablemente durante esta época. En 1890 los científicos describieron “El Niño” como un fenómeno peruano que no tenía impacto en otra región.

En 1920 Sir Gilbert Walker con base a los registros climáticos históricos a nivel mundial, observó que, cuando en el Pacífico occidental se producían presiones altas, en el Pacífico oriental se producían presiones bajas. También se percató, de que cada tres o cinco años este patrón se reinvertía. A esta variación en la presión atmosférica se le llama “Oscilación del Sur”.

La Organización de las Naciones Unidas declaró a 1957 como el “Año Geofísico Internacional”. En el que se midió la temperatura superficial del mar, esto coincidió con la ocurrencia del fenómeno; dando como resultado la correlación de este fenómeno con la elevación de la temperatura superficial del mar, explicando la aparición de la corriente inusualmente cálida que ocurría en la costa de Perú.

A finales de 1960 el profesor Jacob Bjerknes, de la Universidad de California, fue el primero en reconocer la conexión entre las temperaturas inusuales de la superficie del mar y el cambio de la presión atmosférica. Dando origen al reconocimiento del fenómeno “El Niño, Oscilación Sur”, referido con el acrónimo ENOS.

Los efectos de este fenómeno, reportados en Centroamérica son los siguientes: en 1972 se reportó sequía y pérdidas en las cosechas de toda la

región. Asimismo, la precipitación disminuyó ampliamente durante la temporada lluviosa de 1991, resultando en niveles bajos en los embalses y pérdidas considerables en el sector de agricultura.³ En el transcurso de 1997, los efectos del fenómeno “El Niño” en la región, fueron percibidos durante abril y mayo en las costas del Pacífico; y durante junio los efectos fueron considerables, provocando pérdidas en los cultivos de cereales y frijoles de la primera cosecha. Según reportes de Greenpeace Centroamérica (1998), durante la época seca, las altas temperaturas y la sequía favorecieron incendios registrados en gran parte del territorio de Guatemala.

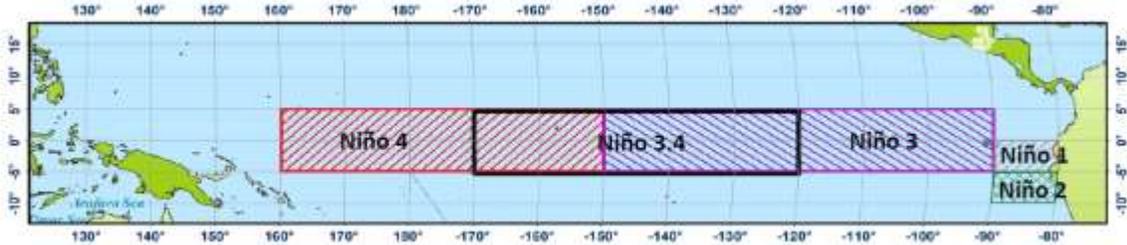
Con la descripción del fenómeno “El Niño” y los antecedentes anteriores se hace evidente que los efectos del fenómeno son periódicos, por lo que es conveniente que sean caracterizados localmente, de allí la necesidad de la realización de este estudio.

1.3. Monitoreo

Durante la ocurrencia del fenómeno “El Niño”, la masa cálida de las costas del Pacífico occidental se desplaza a las costas del Pacífico oriental. Por lo que, la permanente observación satelital del ENSO y la ubicación de instrumentos de observación (por ejemplo: las boyas marinas), se realiza en las llamadas “regiones Niño”. Directamente conectadas con los índices térmicos oceánicos. Se denominan Niño 1+2, Niño3, Niño 4 y Niño 3.4. Están ubicadas por zonas, en el océano Pacífico oriental y central a lo largo de la línea ecuatorial (entre la costa oeste de América del Sur y el meridiano de 180°).

³ GLANTZ. Citado de: CEPREDENAC. *El Fenómeno El Niño 1997-98 en Guatemala*. <http://www.bvsde.paho.org/texcom/cd046995/LHerrera.pdf>. Consulta: 15 de mayo de 2017.

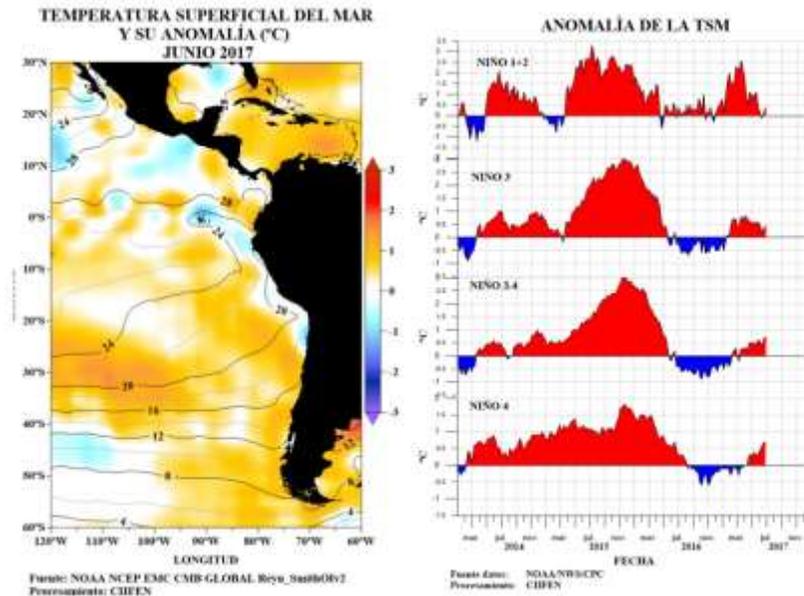
Figura 3. Ubicación de las regiones El Niño



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *El fenómeno de El Niño y su impacto en la generación hidroeléctrica de Chixoy*. <http://www.cnee.gob.gt/wp/?p=2027>. Consulta: 6 de junio de 2017.

Existen diversos índices utilizados para monitorear el Pacífico tropical, uno de ellos se basa en anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) promediadas en cada “región Niño” para indicar su ocurrencia.

Figura 4. Índice de la temperatura superficial del mar (TSM)

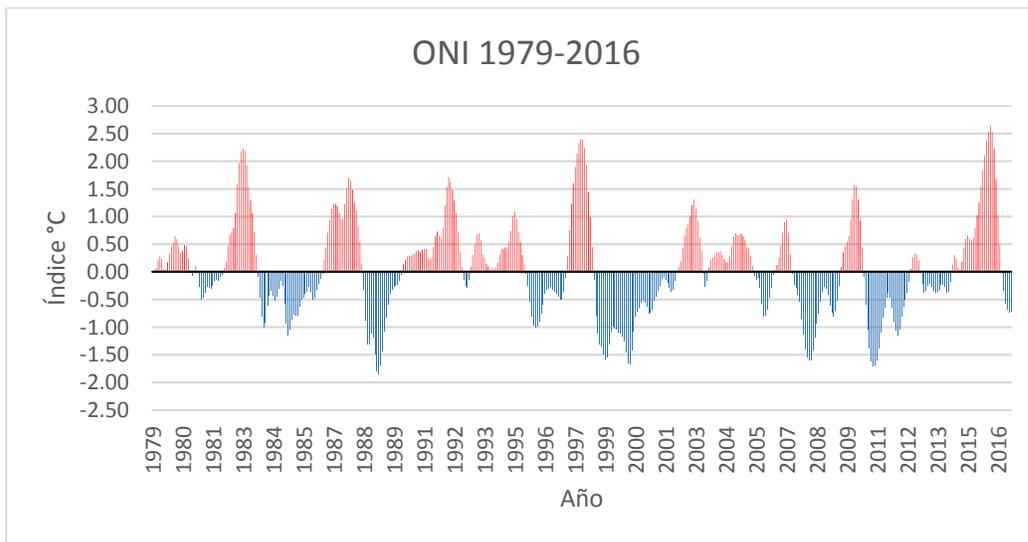


Fuente: *Se aleja la posibilidad de “El Niño” en el pacífico tropical*.

http://www.ciifen.org/images/stories/boletinciifen/Boletin_CIIFEN_Julio_2017.pdf. Consulta: 2 de agosto de 2017.

El Índice Oceánico del Niño (ONI) es uno de los más utilizados para definir el fenómeno. Emplea una media de tres meses, donde las anomalías deben exceder $+0,5^{\circ}\text{C}$ durante al menos cinco meses consecutivos en la región Niño 3.4, que es la más utilizada, ubicándose según sus coordenadas de latitud (5°S - 5°N) y longitud (170°E - 120°E). Cuando la anomalía es $-0,5^{\circ}\text{C}$ durante al menos cinco meses, en la misma región, indica la ocurrencia de un evento de La Niña y a los períodos intermedios se les llama ENSO-Neutral.

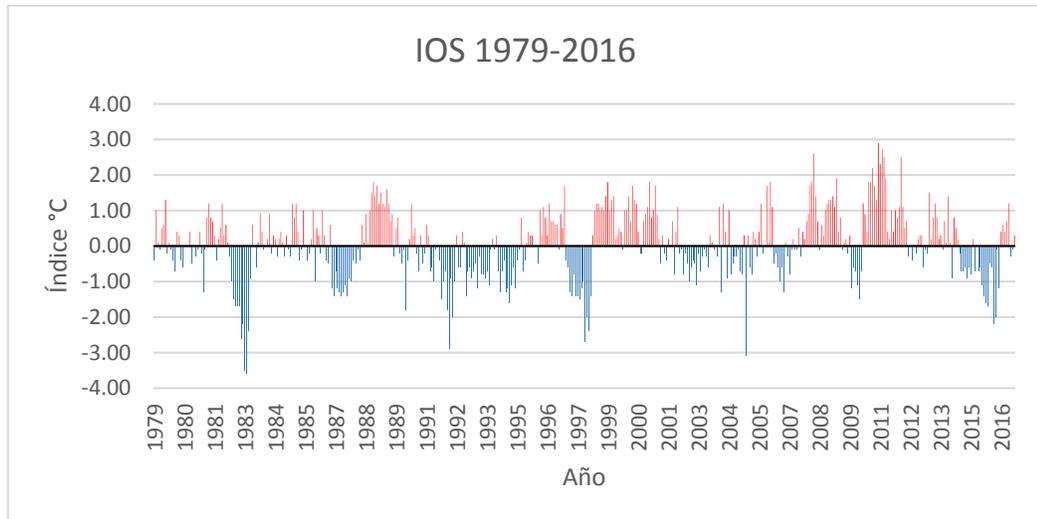
Figura 5. **Comportamiento anomalía ONI, período 1979-2016**



Fuente: elaboración propia con datos de NOAA.

Otro índice utilizado es el Índice de Oscilación Sur (IOS), que representa la componente atmosférica. Se define como la diferencia entre las presiones atmosféricas estandarizadas entre un centro de alta presión cerca de Tahití (1°S , 150°O) y un centro de baja presión en Darwin (12°S , 131°E). Las anomalías negativas del IOS están asociadas a los eventos cálidos sobre el océano.

Figura 6. **Comportamiento mensual IOS, período 1979-2016**



Fuente: elaboración propia con datos de NOAA.

Para fines operativos es posible obtener la base de datos mensual del Índice de Oscilación Sur (SOI) en la siguiente página web: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi> y para temperatura superficial del mar (TSM) la serie de datos se encuentra de manera semanal: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/wksst8110.for> o de manera mensual: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/detrend.nino34.ascii.txt.

2. OBJETO DE ESTUDIO

2.1. Cuenca del río Chixoy hasta la presa de la hidroeléctrica Chixoy

El río Chixoy, es el segundo más largo de Guatemala, también es llamado río Negro. Se alimenta de ríos como el río Blanco, el río Naranja y el río Amarillo hasta llegar a la represa de la hidroeléctrica Chixoy.

La energía hidroeléctrica genera un quinto de la electricidad de todo el mundo y es la forma más barata de generar electricidad en la actualidad.⁴ En Guatemala la hidroeléctrica Chixoy es la de mayor importancia, se ubica en el municipio de San Cristóbal Verapaz, Alta Verapaz. Forma un lago artificial de 14 kilómetros cuadrados, con capacidad de almacenar 313 millones de metros cúbicos de agua. Entró en operación en noviembre de 1983 y tiene un volumen de embalse de 390 millones de metros cúbicos. Por lo que gestionar de manera eficiente el recurso hídrico durante un evento de “El Niño” es de suma importancia, ya que los efectos de este fenómeno se verán reflejados en el nivel de la presa, por consiguiente, en la cantidad de energía eléctrica producida.

2.1.1 Ubicación geográfica

El punto de inicio de la cuenca se encuentra en Huehuetenango hasta la presa de la hidroeléctrica Chixoy; ubicada en Pueblo Viejo, Baja Verapaz.

⁴ National Geographic. *Energía Hidroeléctrica*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/energia-hidroelectrica>. Consulta: 22 de mayo de 2017.

Tabla I. **Coordenadas de inicio y fin del área de estudio**

Cuenca del río Chixoy	Vertiente: Golfo de México	
Inicio	15°65'54" N	90°29'27" W
Fin	15°16'13" N	91°24'49" O

Fuente: elaboración propia.

2.1.2 Delimitación de la cuenca

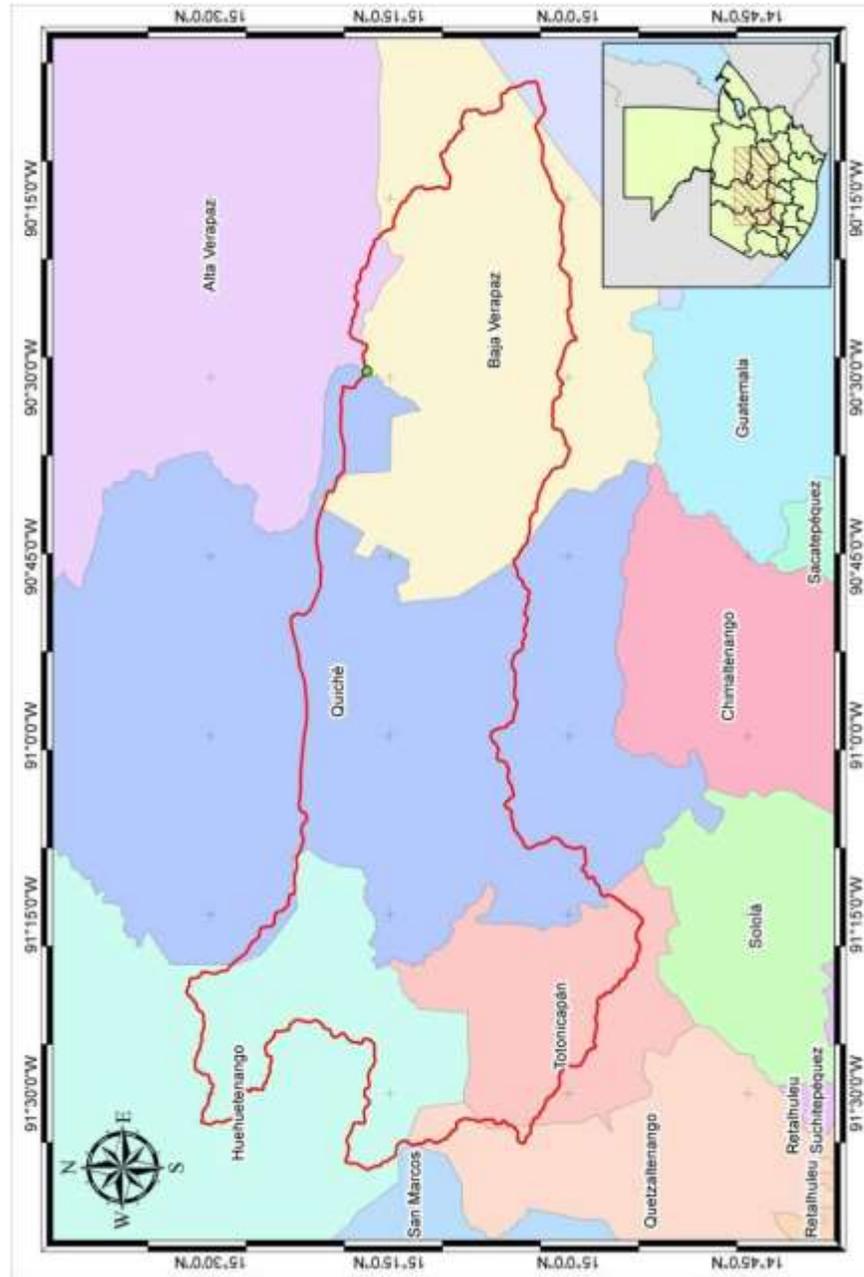
Los departamentos y municipios colindantes a lo largo de su recorrido son los descritos en la siguiente tabla:

Tabla II. **Municipios colindantes**

Departamento	Municipio
Huehuetenango	Aguacatán
Quiché	Canillá
	Cunén Sacapulas
	San Andrés
	Sajcabajá
	San Pedro Jocopilas
	Uspatán
Baja Verapaz	Cubulco
Alta Verapaz	Cobán
	San Cristóbal Verapaz
	Santa Cruz Verapaz

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Mapa delimitación cuenca Chixoy



Fuente: INSIVUMEH. Citado de: REYES DONIS, Gerardo Eleazar. *Determinación de la Variabilidad de los Recursos Hídricos, relacionados al cambio climático en la cuenca del río Chixoy*. p. 2.

2.1.3. Características morfométricas

Las características morfométricas, se pueden definir como el estudio de un conjunto de variables lineales de superficie, relieve y drenaje.⁵ Su fin es conocer las características físicas de la cuenca y su importancia está en la estrecha relación que tienen estas características en el comportamiento del caudal que sobre ellas transita.

El río Chixoy desemboca en la vertiente del Golfo de México, por ello se caracteriza por su gran longitud y por ser de los más caudalosos en el país.⁶ Los parámetros de la cuenca del río Chixoy que se han tomado en cuenta para este estudio se describen en la siguiente tabla:

Tabla III. **Características morfométricas**

Característica	Parámetro
Área (A)	5 494 km ²
Longitud (L)	417,90 km
Cota máxima	3 800 msnm
Cota mínima	650 msnm

Fuente: elaboración propia.

⁵ GASPARI. Citado de: LUX, B. *Conceptos Básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf>. Consultado: 10 de junio de 2017.

⁶ INSIVUMEH. *Programa de Hidrología*. http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/rios_de_guatemala.htm#RED%20HIDROLOGICA. Consulta: 10 de junio de 2017.

2.1.4. Estaciones hidrométricas de la cuenca

Para el estudio se utilizará información recolectada por las estaciones en operación del Instituto Nacional de Electrificación (INDE). En la siguiente tabla se presenta una lista de ellas.

Tabla IV. **Estaciones hidrométricas INDE para datos de precipitación**

Nombre	Departamento	Latitud	Longitud
Chicamán	Quiché	N 15° 20' 45.00"	W 90° 48' 55,00"
Chuitín	Quiché	N 15° 17' 27.96"	W 91° 5' 31,92"
Cubulco	Baja Verapaz	N 15° 6' 32.00"	W 90° 36' 51,00"
El Paradillo	Huehuetenango	N 15° 15' 47.02"	W 91° 19' 54,01"
Huehuetenango	Huehuetenango	N 15° 19' 1.92"	W 91° 30' 11,16"
Nebaj	Quiché	N 15° 23' 53.16"	W 91° 8' 31,92"
Purulha	Baja Verapaz	N 15° 14' 2.00"	W 90° 13' 60,00"
San Andrés	Quiché	N 15° 10' 29"	W 90° 56' 22,00"
San Cristóbal	Alta Verapaz	N 15° 21' 55.01"	W 90° 28' 32,99"
San Jerónimo	Baja Verapaz	N 15° 3' 39.96"	W 90° 15' 0,00"
Santa Cruz del Quiché	Quiché	N 15° 1' 41.00"	W 91° 8' 38,00"
Todos los Santos	Huehuetenango	N 15° 30' 16.92"	W 91° 36' 12.96"
Totonicapán	Totonicapán	N 14° 54' 20.00"	W 91° 22' 20.00"
Xequemeyá	Totonicapán	N 15° 5' 47.00"	W 91° 21' 9.00"

Fuente: elaboración propia.

También se utilizó una estación hidrométrica para el análisis de datos de caudal, ubicada al final de la cuenca.

3. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

3.1. Tablas de contingencia

Una tabla de contingencia o tabulación cruzada es un cuadro de dos dimensiones y cada dimensión contiene una variable. A su vez, cada variable se subdivide en dos o más categorías; el orden de las categorías es irrelevante ya que lo fundamental es que todas las categorías de una variable se crucen con todas las categorías de la otra.⁷ Con r renglones y c columnas se denomina tabla $r \times c$ ("rxc" se lee "r por c"). Los totales de renglones y columnas se denominan frecuencias marginales.⁸

Figura 8. **Tabla de contingencia**

	B_1	B_2	...	B_m	Total
A_1	n_{11}	n_{12}	...	n_{1m}	$n_{1\cdot}$
A_2	n_{21}	n_{22}	...	n_{2m}	$n_{2\cdot}$
...
A_k	n_{k1}	n_{k2}	...	n_{km}	$n_{k\cdot}$
Total	$n_{\cdot 1}$	$n_{\cdot 2}$...	$n_{\cdot m}$	N

Fuente: Universidad de Barcelona. *Análisis de tabla de contingencia*.

<http://www.ub.edu/stat/GrupsInnovacio/Statmedia/demo/Temas/Capitulo12/B0C12m1t5.htm>.

Consulta: 2 de agosto de 2017.

⁷ HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. *Metodología de la investigación*. p 321.

⁸ WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p 374.

Las tablas de contingencia se utilizan para analizar la relación de dependencia o independencia entre dos variables cualitativas, con el fin de comprobar la hipótesis correlacional sobre la relación entre las dos variables. También son útiles para describir conjuntamente dos o más variables, al convertir las frecuencias observadas en frecuencias relativas o porcentajes se tiene el porcentaje en relación con el total de frecuencias observadas.⁹

3.2. Prueba exacta de Fisher

Cuando el objetivo del análisis de la tabla de contingencia es determinar si existe relación entre las variables, se tratará de una prueba de independencia, por el contrario, si cada fila corresponde a una muestra de una población diferente y sobre cada individuo se mide una variable cualitativa, el objetivo será determinar si las diferentes poblaciones son homogéneas respecto de la característica estudiada, entonces será una prueba de homogeneidad entre las poblaciones. En resumen, la diferencia entre ambas pruebas es, si la prueba es de homogeneidad, es que los totales de las filas no son aleatorios sino valores fijos.

La prueba exacta de Fisher fue introducida por Ronald A. Fisher, genetista y estadístico de la década de 1920; esta prueba establece si la variable de fila y la variable de columna son independientes. Se acepta la hipótesis nula cuando el valor p es mayor que los niveles de significancia (α).

Es una comparación entre la tabla de contingencia con frecuencias observadas y la denominada tabla de contingencia de frecuencias esperadas,

⁹ WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p 375.

esta última sería la esperada si las variables fueran estadísticamente independientes o no estuvieran relacionadas.¹⁰

Para obtener la tabla de frecuencias esperadas se utiliza la siguiente ecuación obtenida del libro de Walpole, tomando los datos obtenidos de la tabla con frecuencias observadas:

$$frecuencia\ esperada = \frac{(total\ por\ columna) * (total\ por\ renglón)}{gran\ total}$$

Esta prueba se utiliza cuando las condiciones necesarias para la prueba Chi-cuadrada no se cumplen, es decir, cuando los valores esperados de al menos el 80% de las frecuencias esperadas de la tabla de contingencia son mayores que 5.

3.3. Análisis de correlación

Es una técnica que establece el grado de asociación o correlación entre dos o más variables de una población. Es expresado por un número llamado coeficiente de correlación, representado por la letra *c*, que toma valores entre -1 y 1. Su objetivo es establecer la pertinencia del análisis de regresión.

Si la correlación entre dos variables cuantitativas solo involucra una variable independiente, se le llama correlación simple. En cambio, si la relación involucra más de una variable independiente con una dependiente se llama correlación múltiple; si se encuentra la relación entre dos variables manteniendo el resto constante se le llama correlación parcial. Y si se encuentra la correlación entre un grupo de variables dependientes y un grupo de variables independientes se le denomina correlación canónica.

¹⁰ HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. *Metodología de la investigación*. p 319.

La correlación hace posible el cálculo del coeficiente de determinación R^2 utilizado para medir la bondad del ajuste de un modelo de regresión, siempre es un valor positivo, el modelo que posea el valor mayor de R^2 será el que mejor se ajusta. Para empezar el análisis de correlación se deben escoger las variables cuantitativas que serán el objeto de estudio; una variable será la predictiva representada por la letra “X” también llamada variable independiente y la otra será la variable de respuesta “Y” también llamada variable dependiente.

Luego, se reducen a parejas que son designadas de la forma estándar $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$, este proceso resulta con una muestra de n parejas de datos. Después se grafican las parejas de datos en un diagrama de puntos bivariable, llamado diagrama de dispersión, empleado para identificar patrones de asociación o correlación entre las variables. La variable independiente se representa en el eje horizontal y la variable dependiente en el eje vertical.

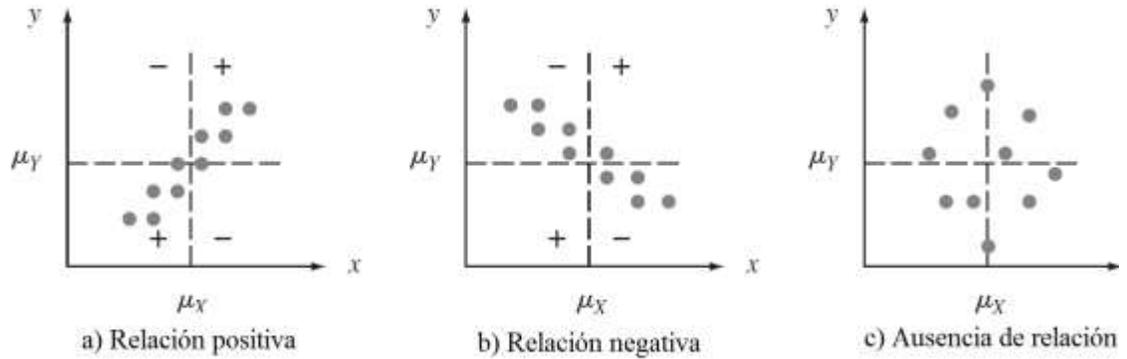
3.3.1. Correlación lineal

Es la correlación que verifica la relación entre dos variables cuantitativas, una dependiente y la otra independiente, se identifica cuando la disposición de los puntos en el diagrama de dispersión sigue un patrón lineal, entonces se tiene el caso más sencillo del análisis de correlación. Las propiedades del coeficiente de correlación lineal son las siguientes:

- Relación positiva: cuando aumenta X aumenta Y, c toma valores positivos.
- Relación negativa: cuando disminuye X disminuye Y, c toma valores negativos.
- Ausencia de relación: cuando los datos están dispersos por todo el diagrama y c tiende a cero.

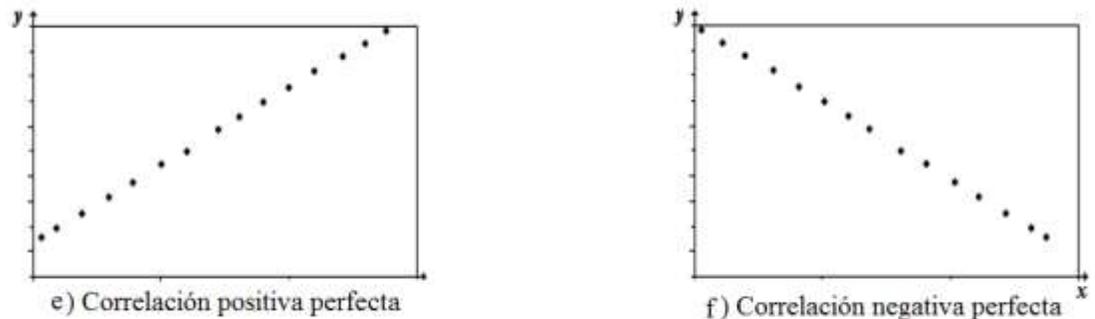
- Correlación positiva perfecta cuando $c = 1$.
- Correlación negativa perfecta cuando $c = -1$.

Figura 9. Tipos de correlación



Fuente: DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 198.

Figura 10. Correlación perfecta



Fuente: NIEVES, Antonio y DOMÍNGUEZ, Federico. *Probabilidad y estadística para ingeniería un enfoque moderno*. p. 135.

3.3.2. Coeficiente de correlación

Es una medida aritmética del tipo y grado de correlación lineal entre dos variables cuantitativas, en un modelo lineal. Un cambio en el valor de “Y” tiende a responder a un cambio en el valor de “X”, lo cual, no implica que el cambio de

una variable cause el cambio en la otra variable. Se representa con la letra r , mide que tan bien un modelo lineal representa los puntos del diagrama de dispersión. Sus propiedades son:

- Su valor es independiente a las unidades en que las variables sean medidas.
- Toma valores dentro del rango de -1 a 1.
- Tomará el valor de 1 si y solo si todos los pares de puntos están en una recta. El signo será positivo o negativo dependiendo de la pendiente.
- Posee simetría, dado que, su valor no depende de cuál de las variables se designe como dependiente e independiente.
- Solo está diseñado para medir la fuerza de la relación lineal.

El aspecto que se debe considerar al utilizar el coeficiente de correlación es que los valores atípicos afectan considerablemente el resultado, por lo que se deben identificar. Posteriormente, se debe volver a calcular el coeficiente sin ellos, si el resultado difiere en gran medida del resultado, el análisis es inválido.

3.3.3. Correlación múltiple

La correlación lineal describe que el comportamiento de una variable dependiente es explicado estadísticamente por el comportamiento de la variable independiente, tomando en cuenta dos variables en el estudio. Sin embargo, en modelos que se acercan más a la realidad es común que el comportamiento de una variable dependiente sea explicado estadísticamente de mejor manera por el comportamiento simultáneo de más de una variable independiente. En estos casos se emplea la correlación múltiple.

3.4. Análisis de regresión

Es una técnica estadística que proporciona una función de tipo $Y = f(x)$ que describe de forma estadística la asociación que existe entre las variables, con el fin de predecir valores de la variable dependiente. A la línea resultante que describe matemáticamente la forma del diagrama de dispersión se le llama recta de regresión, es una recta que ajusta la nube de puntos graficados y describe el cambio en la variable dependiente debido al cambio de la variable independiente, esta debe pasar tan cerca de todos los puntos del diagrama como sea posible.

En resumen, la finalidad de la recta es representar algebraicamente los datos. El ajuste más utilizado es por mínimos cuadrados; en el cual la recta pasa entre los puntos de la muestra, de forma que produzca el área total mínima.

La regresión lineal es representada por la ecuación $\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1x + \varepsilon$, que representa la recta de regresión que considera el error ε aleatorio, su presencia se debe a que siempre hay una variación en “Y” debida al fenómeno aleatorio. Dicho componente, adicionado a la recta de regresión proporciona el valor de predicción verdadero.

Cuando no es conveniente ajustar una línea recta con el diagrama de dispersión pero es una función de tipo $Y = f(x)$ que relaciona a y con x se dice que es intrínsecamente lineal, si por medio de una transformación en x o en y o en ambas, la función se puede expresar en general como una función lineal $y = b_0 + b_1x + a$, siendo x la variable independiente transformada, y la variable dependiente transformada y los parámetros representados por: b_1 , b_2 y a .

Para b_1 :

$$b_1 = \frac{[\sum x_2^2 - n(\bar{x}_2)^2][\sum x_1 Y - n(\bar{x}_1)(\bar{Y})] - [\sum x_1 x_2 - n(\bar{x}_1)(\bar{x}_2)][\sum x_2 Y - n(\bar{x}_2)(\bar{Y})]}{[\sum x_1^2 - n(\bar{x}_1)^2][\sum x_2^2 - n(\bar{x}_2)^2] - [\sum x_1 x_2 - n(\bar{x}_1)(\bar{x}_2)]^2}$$

Para b_2 :

$$b_2 = \frac{[\sum x_1^2 - n(\bar{x}_1)^2][\sum x_2 Y - n(\bar{x}_2)(\bar{Y})] - [\sum x_1 x_2 - n(\bar{x}_1)(\bar{x}_2)][\sum x_1 Y - n(\bar{x}_1)(\bar{Y})]}{[\sum x_1^2 - n(\bar{x}_1)^2][\sum x_2^2 - n(\bar{x}_2)^2] - [\sum x_1 x_2 - n(\bar{x}_1)(\bar{x}_2)]^2}$$

Para a :

$$a = \bar{Y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2$$

Para encontrar el coeficiente de correlación múltiple:

$$r = \sqrt{\frac{a \sum Y + b_1 \sum x_1 Y + b_2 \sum x_2 Y - n \bar{Y}^2}{\sum Y^2 - n \bar{Y}^2}}$$

4. VARIABLES DE ESTUDIO

4.1. Cuenca del río Chixoy

El caudal y la precipitación dentro de este estudio representan las variables dependientes. A continuación, se presentan los datos de caudal y precipitación mensuales, graficados según su estación de medición. Obsérvese su variabilidad a lo largo del período de estudio que comprende desde 1979 hasta 2016:

4.1.1 Precipitación

Las estaciones meteorológicas utilizadas según su ubicación se observan en la siguiente figura:

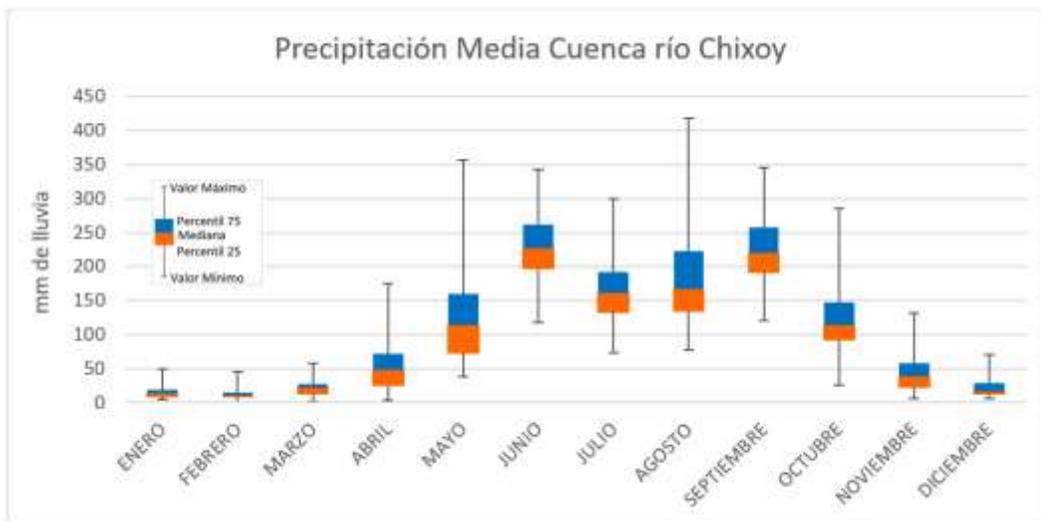
Figura 11. Ubicación de estaciones: precipitación



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Sobre el área de la cuenca del río Chixoy analizada, se tiene una precipitación promedio anual de 1 235,9 mm de lluvia. Se representa gráficamente en la siguiente figura, la variabilidad de la precipitación media, donde se define que la época lluviosa representa un 86% de la precipitación promedio anual y abarca los meses de mayo a octubre, por lo que únicamente estos meses son significativos para este estudio.

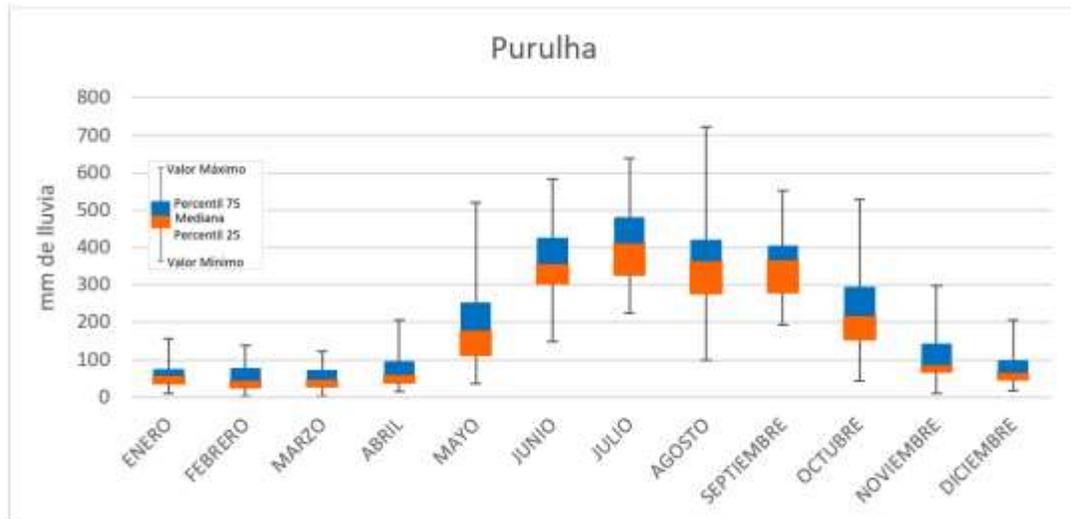
Figura 12. **Comportamiento mensual de la precipitación media sobre la cuenca, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta el comportamiento mensual de la precipitación según estaciones desde 1979 a 2016, por medio de cada gráfica se define la época lluviosa de cada estación.

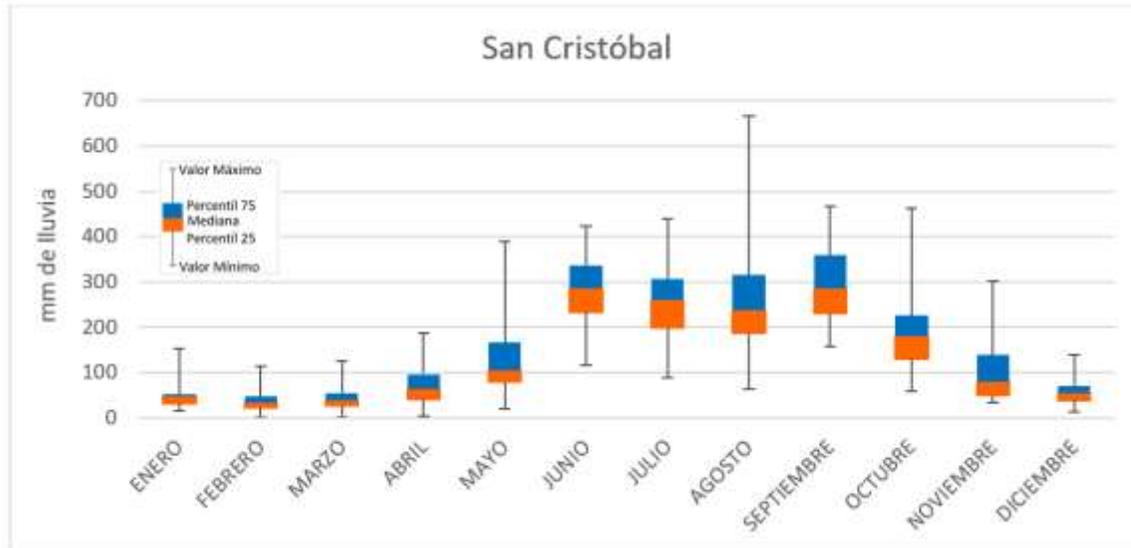
Figura 13. **Comportamiento mensual precipitación, estación Purulhá, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Purulhá comprende desde mayo hasta noviembre y representa el 86 % de la precipitación promedio anual de la estación.

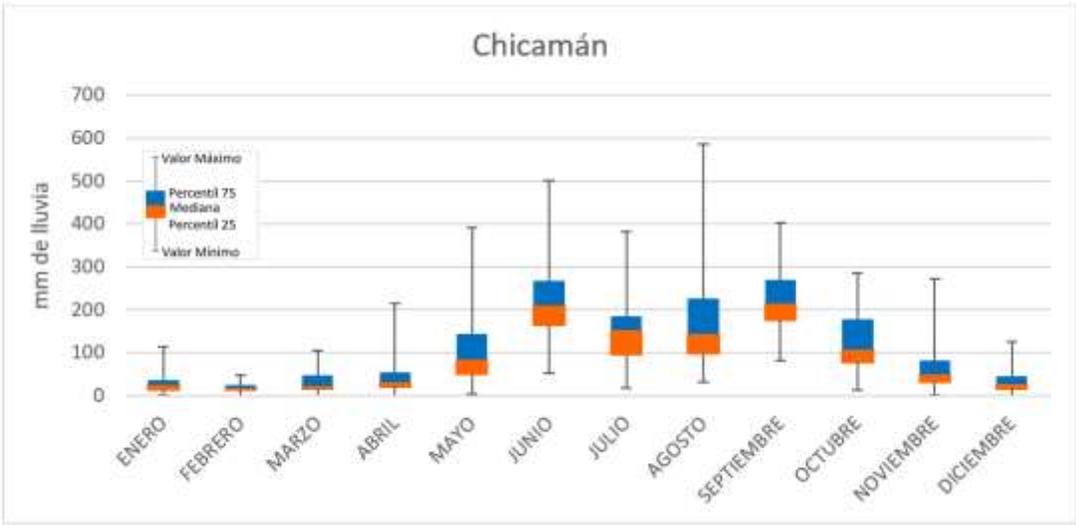
Figura 14. **Comportamiento mensual precipitación, estación San Cristóbal, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de San Cristóbal comprende desde abril hasta diciembre y representa el 89 % de la precipitación promedio anual de la estación.

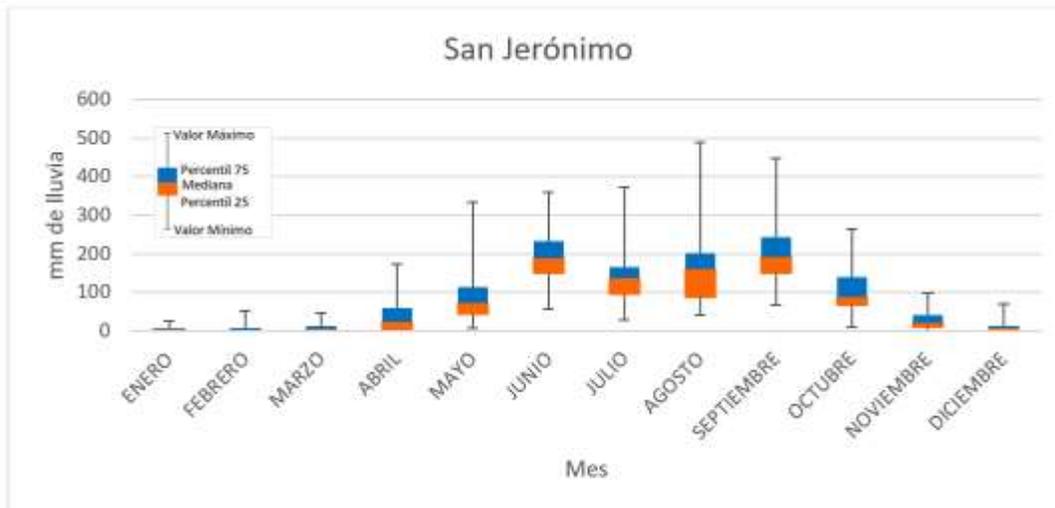
Figura 15. **Comportamiento mensual precipitación, estación Chicamán, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Chicamán comprende desde mayo hasta noviembre y representa el 87 % de la precipitación promedio anual de la estación.

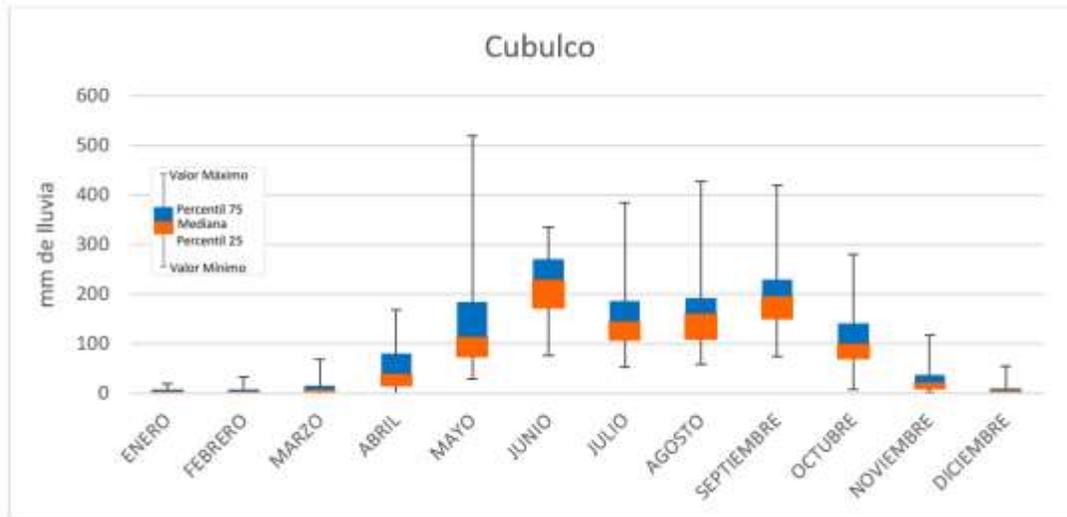
Figura 16. **Comportamiento mensual precipitación, estación San Jerónimo, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de San Jerónimo comprende desde mayo hasta octubre y representa el 90 % de la precipitación promedio anual de la estación.

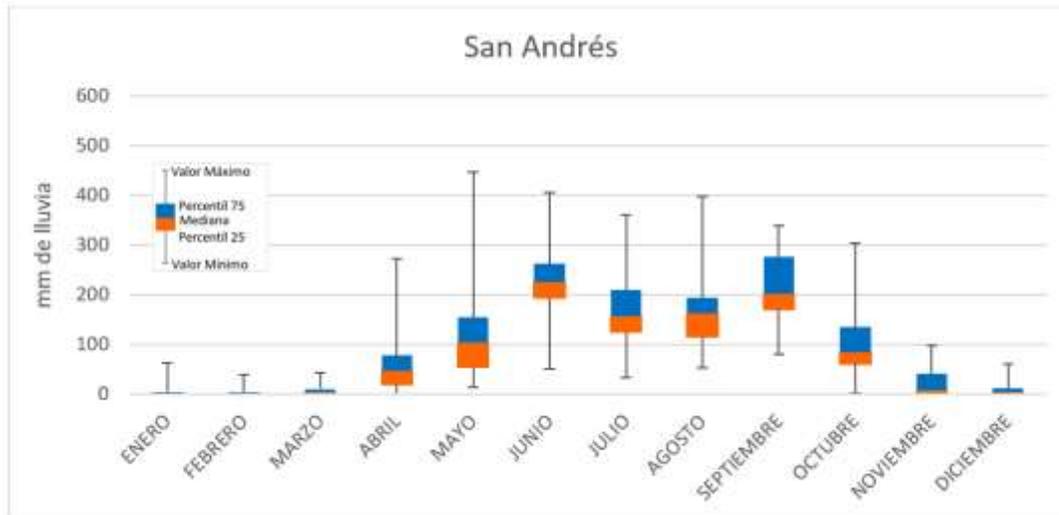
Figura 17. **Comportamiento mensual precipitación, estación Cubulco, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Cubulco comprende desde abril hasta octubre y representa el 95 % de la precipitación promedio anual de la estación.

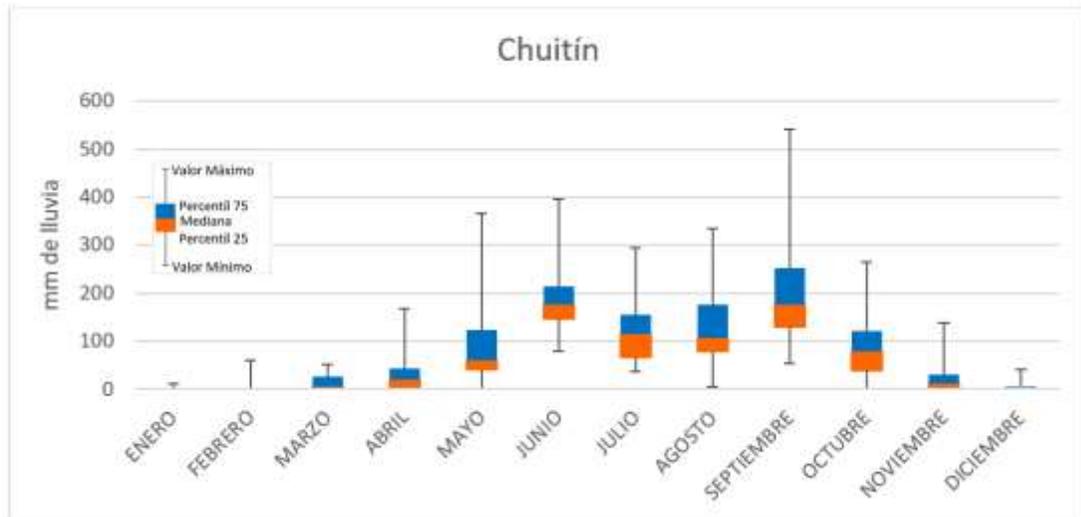
Figura 18. **Comportamiento mensual precipitación, estación San Andrés, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de San Andrés comprende desde abril hasta octubre y representa el 96 % de la precipitación promedio anual de la estación.

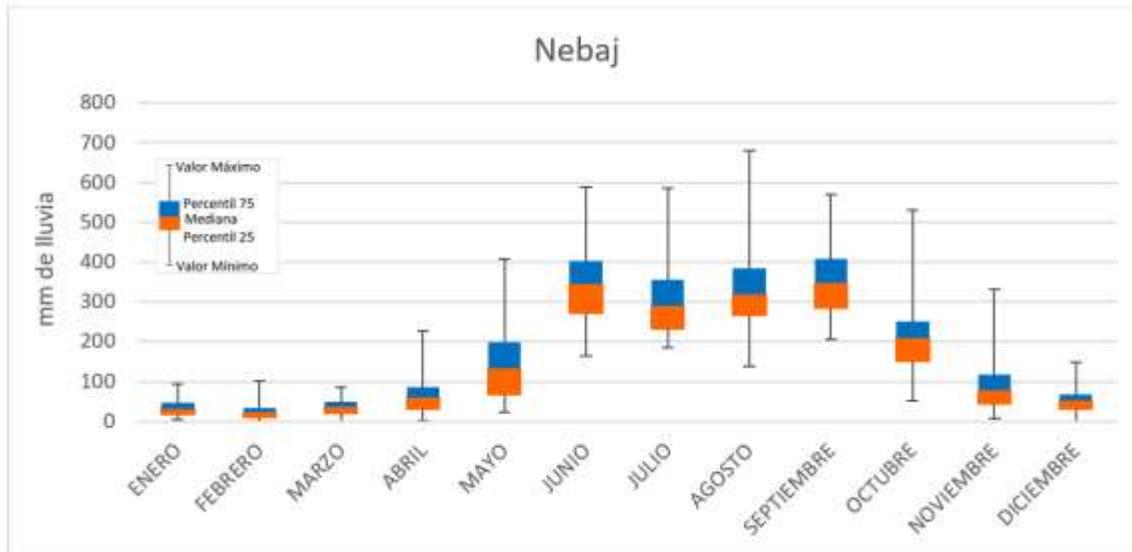
Figura 19. **Comportamiento mensual precipitación, estación Chuitín, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Chuitín comprende desde mayo hasta octubre y representa el 91 % de la precipitación promedio anual de la estación.

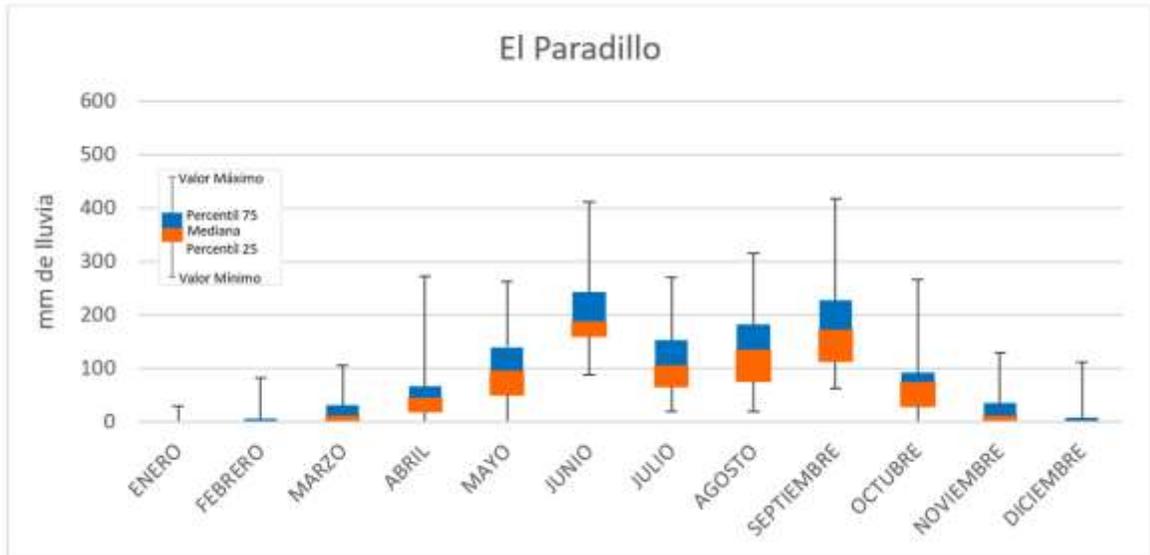
Figura 20. **Comportamiento mensual precipitación, estación Nebaj, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Nebaj comprende desde mayo hasta noviembre y representa el 89 % de la precipitación promedio anual de la estación.

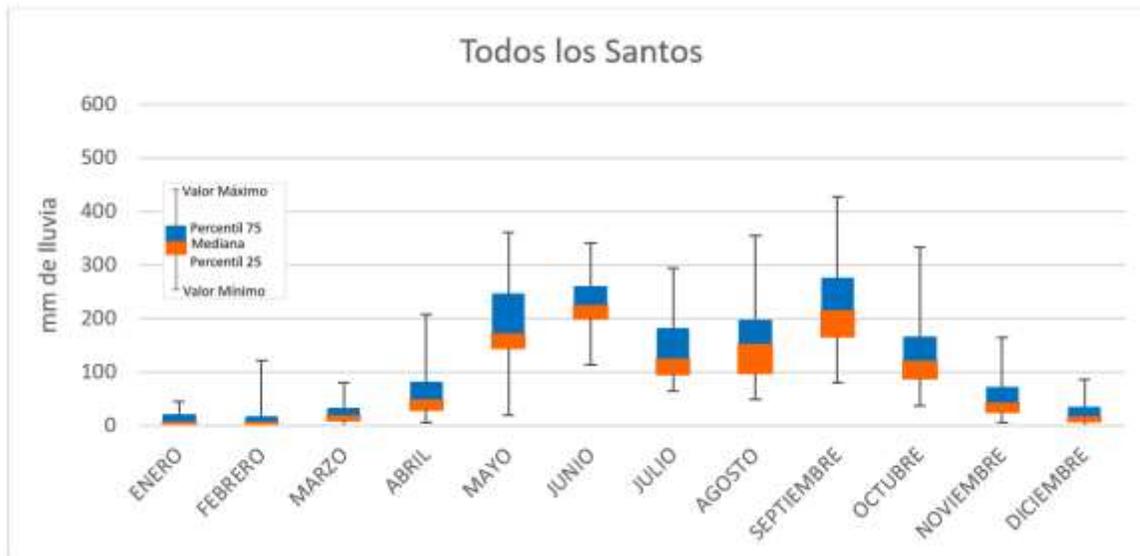
Figura 21. **Comportamiento mensual precipitación, estación El Paradillo, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de El Paradillo comprende desde abril hasta octubre y representa el 93 % de la precipitación promedio anual de la estación.

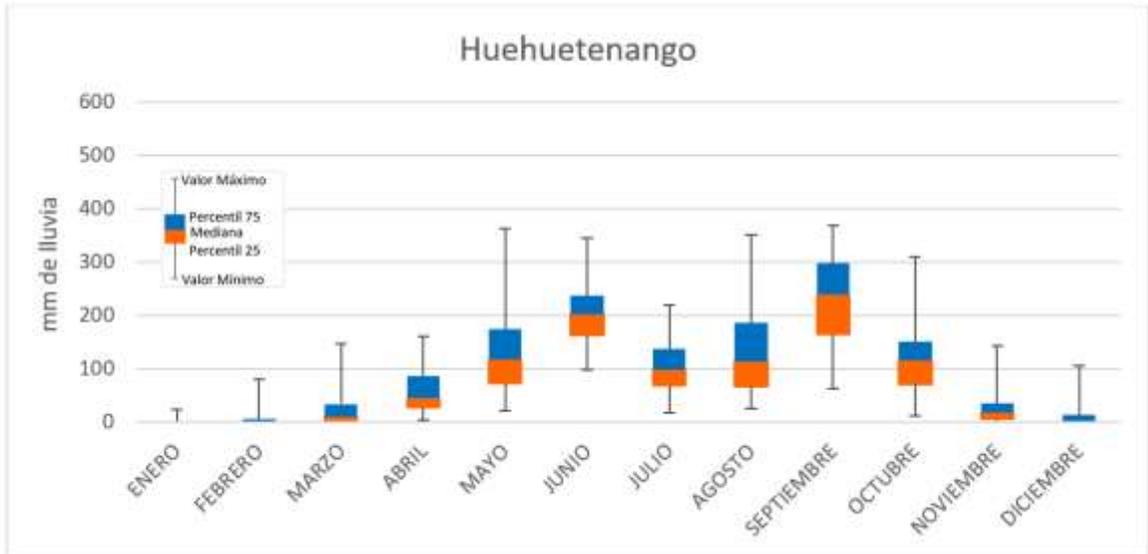
Figura 22. **Comportamiento mensual precipitación, estación Todos los Santos, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Todos los Santos comprende desde abril hasta noviembre y representa el 94 % de la precipitación promedio anual de la estación.

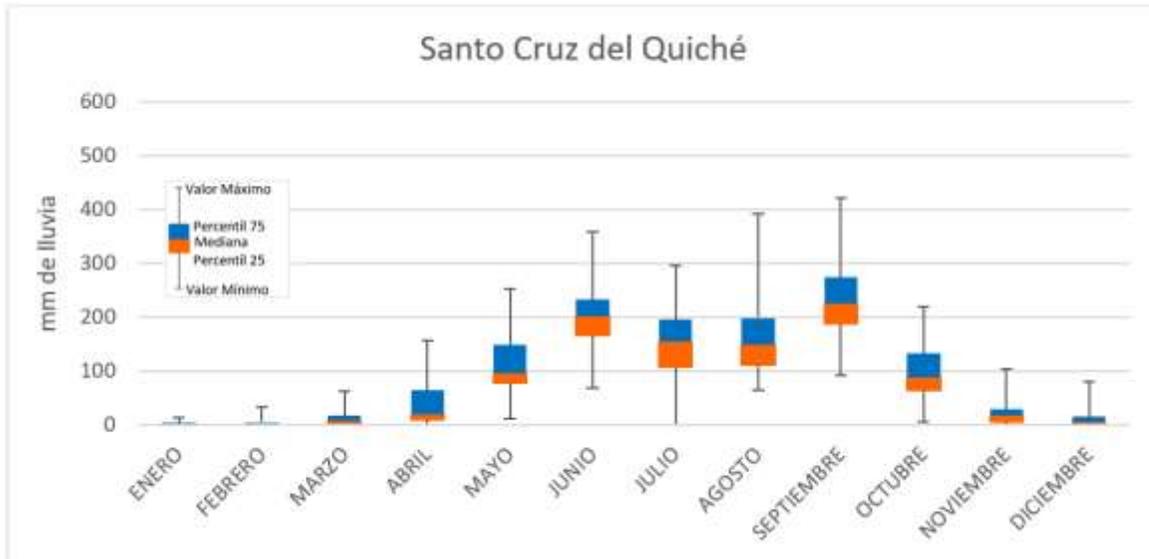
Figura 23. **Comportamiento mensual precipitación, estación Huehuetenango, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Huehuetenango comprende desde mayo hasta octubre y representa el 88 % de la precipitación promedio anual de la estación.

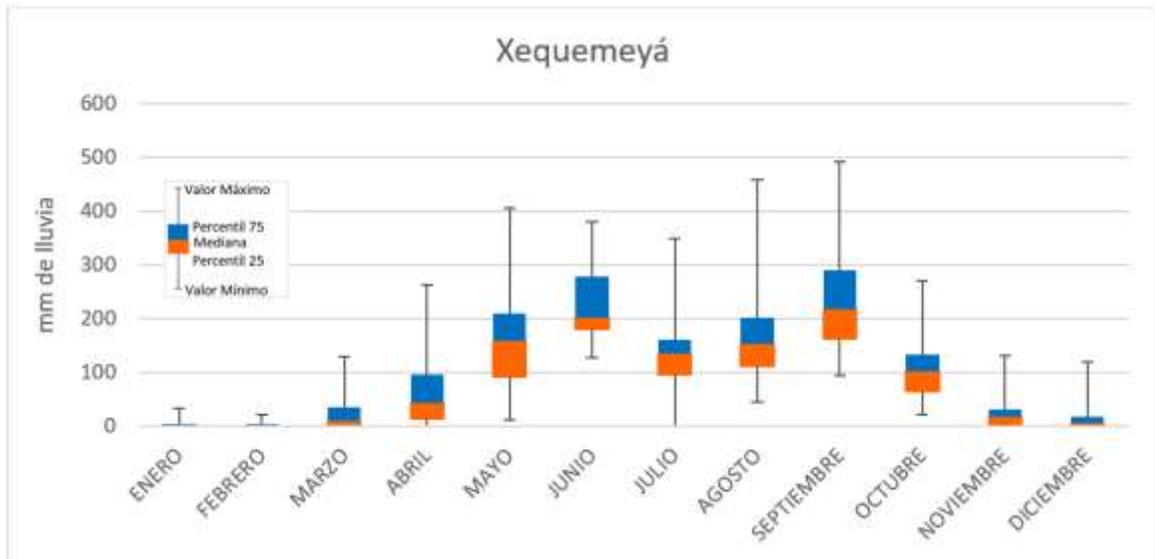
Figura 24. **Comportamiento mensual precipitación, estación Santa Cruz del Quiché, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Santa Cruz del Quiché comprende desde mayo hasta octubre y representa el 92 % de la precipitación promedio anual de la estación.

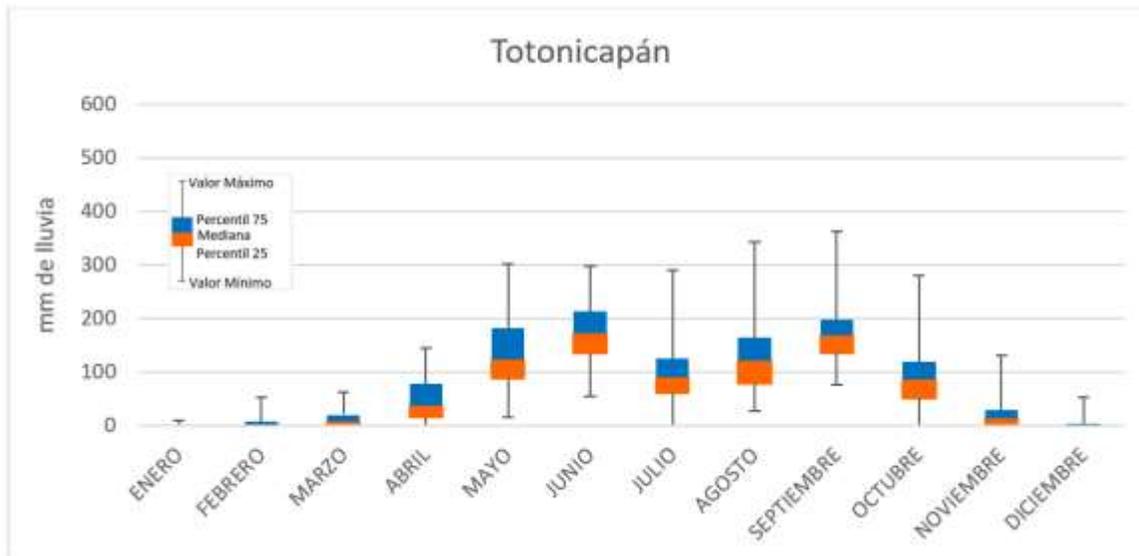
Figura 25. **Comportamiento mensual precipitación, estación Xequemeyá, período 1979 - 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Xequemeyá comprende desde abril hasta octubre y representa el 94 % de la precipitación promedio anual de la estación.

Figura 26. **Comportamiento mensual precipitación, estación Totonicapán, período 1979 - 2016**



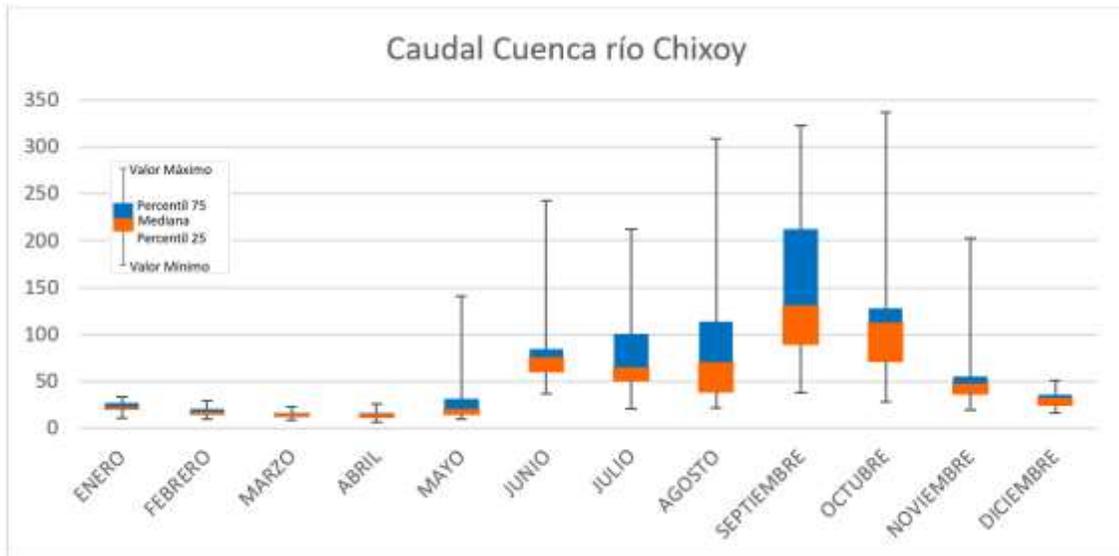
Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

Con la gráfica anterior, se define que la época lluviosa para la estación de Totonicapán comprende desde mayo hasta octubre y representa el 89 % de la precipitación promedio anual de la estación.

Caudal

Se utilizaron datos desde enero de 1984 hasta julio de 2016; su comportamiento se representa gráficamente en la siguiente figura, donde se observa que la época lluviosa está definida desde mayo hasta noviembre y representa el 85 % del caudal promedio anual.

Figura 27. **Comportamiento mensual del caudal sobre la cuenca del río, período enero 1984 – julio 2016**



Fuente: elaboración propia con datos del INDE.

4.2. Fenómeno El Niño

Anteriormente, se hizo mención de los componentes atmosféricos y oceánicos del fenómeno El Niño. Estas medidas representan las variables independientes de este estudio. Para comprender su comportamiento durante el período de estudio, que comprende los años entre 1979 hasta 2016, se graficaron los datos proporcionados por NOAA. Las gráficas resultantes se encuentran en el apartado de apéndices.

El componente oceánico se mide por medio de: el índice oceánico del niño (ONI) y la temperatura superficial del Mar (TSM) en cada una de las regiones Niño. Por otro lado, el componente atmosférico se mide por medio de el índice de oscilación sur (IOS) mensual, por lo que se graficaron los valores estandarizados y de anomalía para cada región Niño.

5. RESULTADOS

5.1. Precipitación

Para el análisis de datos de precipitación se contaba con datos desde 1970 hasta 2016. Sin embargo, en algunas estaciones los datos desde 1970 hasta 1978 eran insuficientes para hacer un relleno de datos significativo, por lo que se retiró este período y se estableció como período de estudio desde 1979 hasta 2016.

A pesar de que la época lluviosa, según las figuras anteriores, en la mayoría de las estaciones va desde mayo hasta octubre el análisis realizado tomó en cuenta desde abril hasta noviembre debido a que en algunas estaciones se tiene un inicio de época lluviosa adelantada y en otras se tiene un fin de época lluviosa tardío.

Después de establecer el comportamiento de las variables, se definieron los períodos de eventos El Niño y La Niña utilizando los datos del ONI, ya que si la anomalía excede $+0,5C$ durante al menos tres trimestres consecutivos en la región Niño 3,4 indica la ocurrencia de un evento El Niño, así cuando la anomalía es $-0,5C$ durante al menos tres trimestres consecutivos en la misma región indica la ocurrencia de un evento La Niña y a los períodos intermedios se les llama ENSO-neutral.

Por medio de tablas de contingencia, se clasificaron datos cuantitativos de precipitación y caudal a clasificaciones cualitativas según las condiciones climáticas y la ocurrencia de eventos. Con base en los percentiles 0,33 y 0,66 se

clasificaron tres condiciones climáticas que son: “seco”, “normal” y “lluvioso”. Así mismo, dentro de esta clasificación se relacionaron los eventos del ciclo ENOS dados por el índice oceánico El Niño (ONI), con sus respectivas clasificaciones de: “Niño”, “Neutral” y “Niña”. También, se utilizó como prueba de independencia la prueba exacta de Fisher para determinar con 5 % de significancia la dependencia entre las variables involucradas en la tabla de contingencia, para luego determinar el porcentaje de veces que es probable que las condiciones climáticas dadas sean las descritas en la tabla de contingencia.

Al tener estos resultados se pudo hacer una caracterización gráfica, por medio de la realización de mapas, donde por cada mes se presentan las probabilidades de ocurrencia de las distintas condiciones durante cada evento sobre el área estudiada de la cuenca; haciendo más fácil la ubicación de las zonas en la cuenca más propensas a ser afectadas durante la ocurrencia de un evento El Niño, La Niña o durante ENSO-neutral.

También se presentan las correlaciones simples realizada con los datos de precipitación y caudal de la cuenca, y el ONI; luego se presentan las correlaciones múltiples realizadas con la TSM y el IOS con los datos de precipitación y caudal de la cuenca con rezagos de uno, dos y tres meses. Tabulándose los modelos matemáticos para la región y el rezago con correlación múltiple mayor a 0,5.

Tabla V. Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, abril

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
Purulha	SECO	57%	28%	33%	57%	43%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	29%	36%	17%			
	LLUVIOSO	14%	36%	50%			
San Cristóbal	SECO	43%	36%	17%	67%	33%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	14%	36%	33%			
	LLUVIOSO	43%	28%	50%			
Chicamán	SECO	14%	44%	17%	25%	75%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	57%	28%	17%			
	LLUVIOSO	29%	28%	67%			
San Jerónimo	SECO	43%	24%	67%	6%	94%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	43%	24%	33%			
	LLUVIOSO	14%	52%	0%			
Cubulco	SECO	57%	24%	50%	10%	90%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	43%	28%	33%			
	LLUVIOSO	0%	48%	17%			
San Andrés	SECO	29%	28%	67%	18%	82%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	57%	32%	0%			
	LLUVIOSO	14%	40%	33%			
Chuitín	SECO	43%	32%	33%	48%	52%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	43%	24%	50%			
	LLUVIOSO	14%	44%	17%			
Nebaj	SECO	43%	32%	33%	100%	0%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	29%	32%	33%			
	LLUVIOSO	29%	36%	33%			
El Paradillo	SECO	57%	32%	17%	15%	85%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	0%	32%	67%			
	LLUVIOSO	43%	36%	17%			
Todos los Santos	SECO	57%	28%	33%	75%	25%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	14%	36%	33%			
	LLUVIOSO	29%	36%	33%			
Huehuetenango	SECO	43%	32%	33%	82%	18%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	43%	28%	33%			
	LLUVIOSO	14%	40%	33%			
Santa Cruz del Quiché	SECO	29%	36%	33%	57%	43%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	57%	28%	17%			
	LLUVIOSO	14%	36%	50%			
Xequemeyá	SECO	29%	28%	67%	37%	63%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	43%	36%	0%			
	LLUVIOSO	29%	36%	33%			
Totonicapán	SECO	29%	32%	50%	95%	5%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	43%	32%	17%			
	LLUVIOSO	29%	36%	33%			

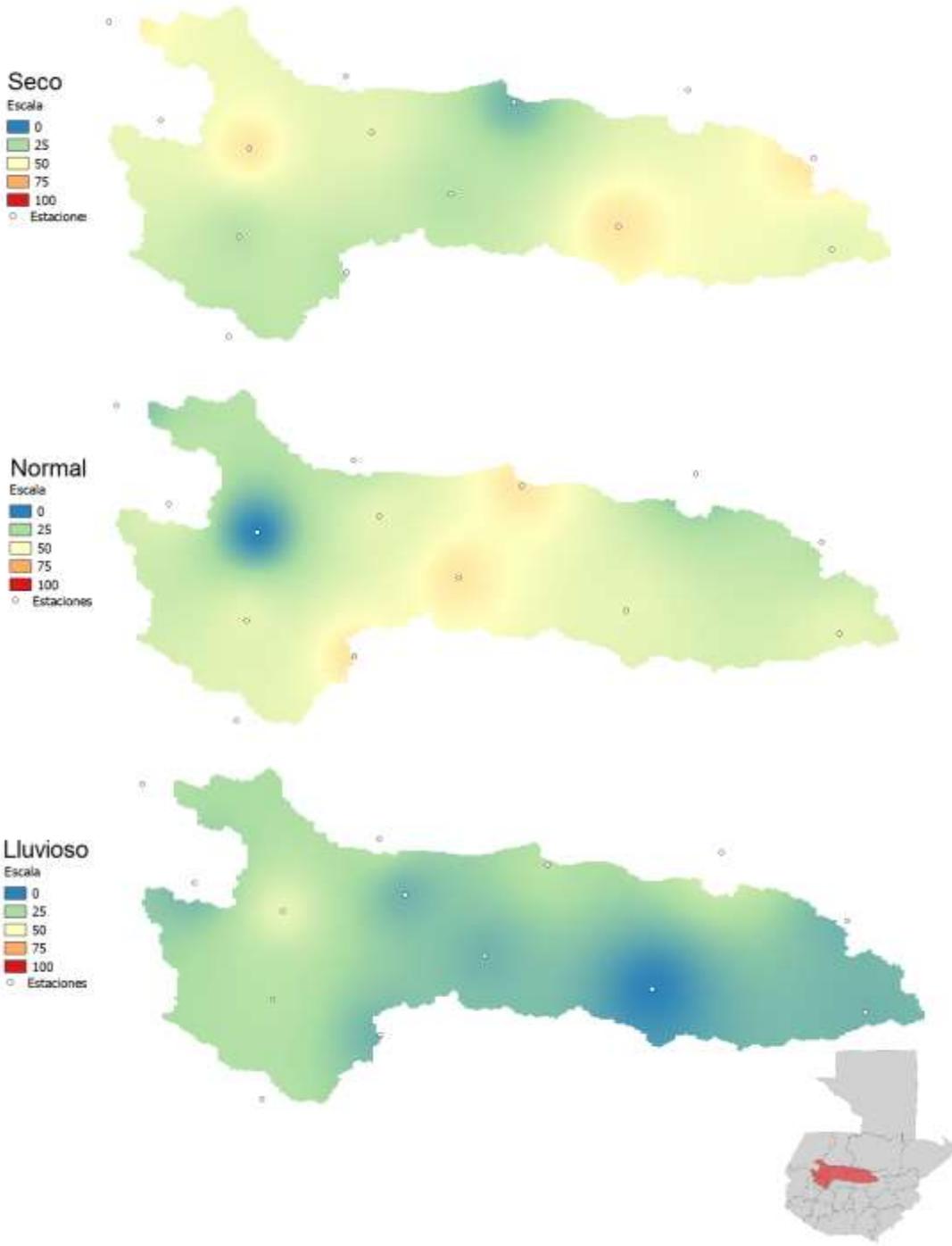
Fuente: elaboración propia.

Según la tabla de contingencia realizada para para abril: durante El Niño la condición seca predominó en cinco de catorce estaciones, durante La Niña la condición lluviosa predominó en tres estaciones y durante ENSO-neutral predominó la condición lluviosa en ocho estaciones.

La prueba exacta de Fisher demostró, con 5 % de significancia, que existe independencia entre las condiciones climáticas y la ocurrencia de eventos del ciclo ENOS en todas las estaciones de estudio.

De los mapas siguientes se obtuvo que: durante El Niño la condición seca predominó en Cubulco, Purulhá y El Paradillo; teniendo una condición normal en Chicamán, San Andrés y Santa Cruz del Quiché. Durante ENSO-neutral la condición normal predominó en Xequemeyá, San Cristóbal y Purulhá; predominando una condición lluviosa en San Jerónimo. Y durante La Niña la condición lluviosa predominó en Chicamán y Santa Cruz del Quiché; predominando una condición seca en Xequemeyá y San Andrés.

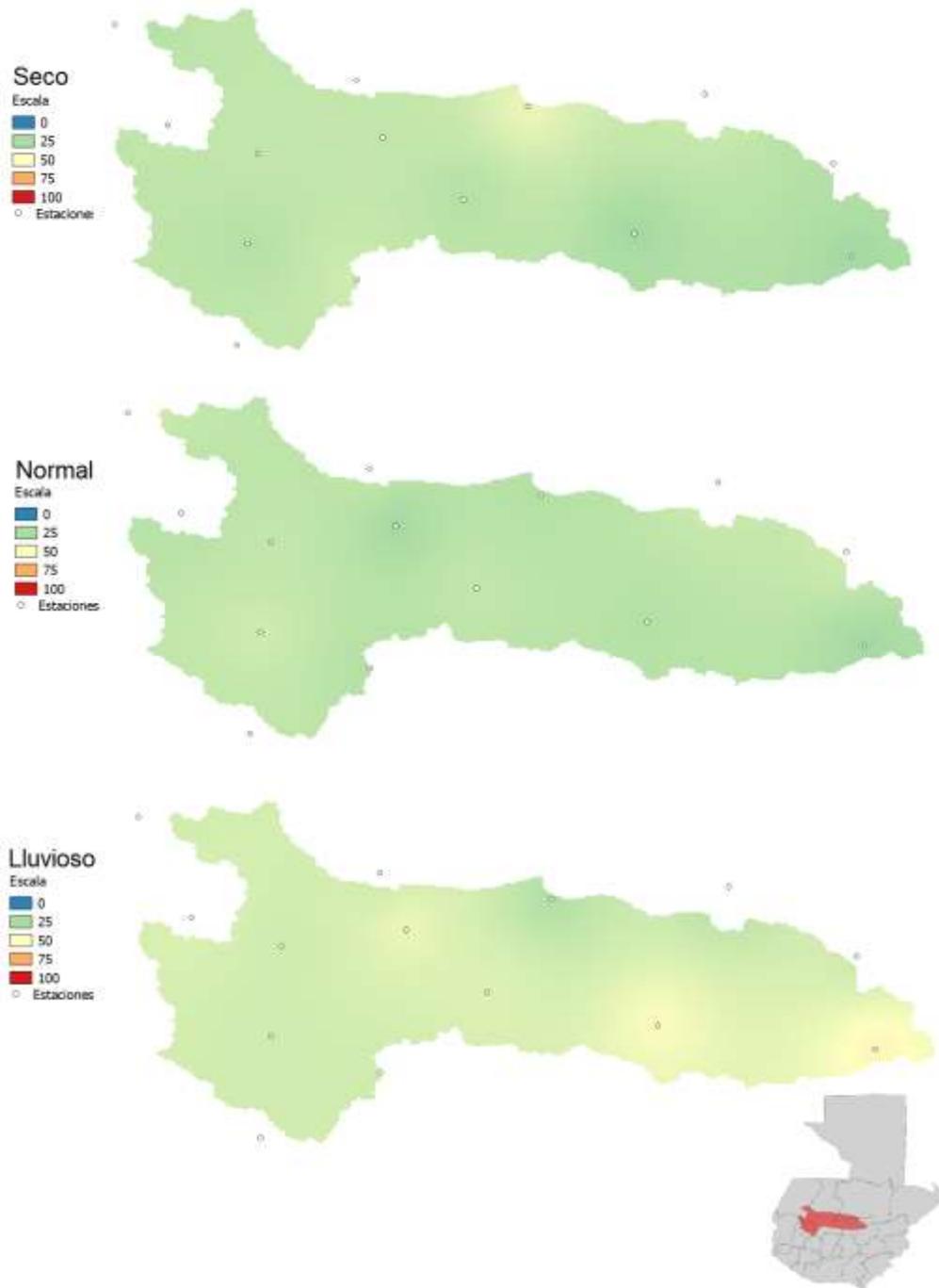
Figura 28. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, abril**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

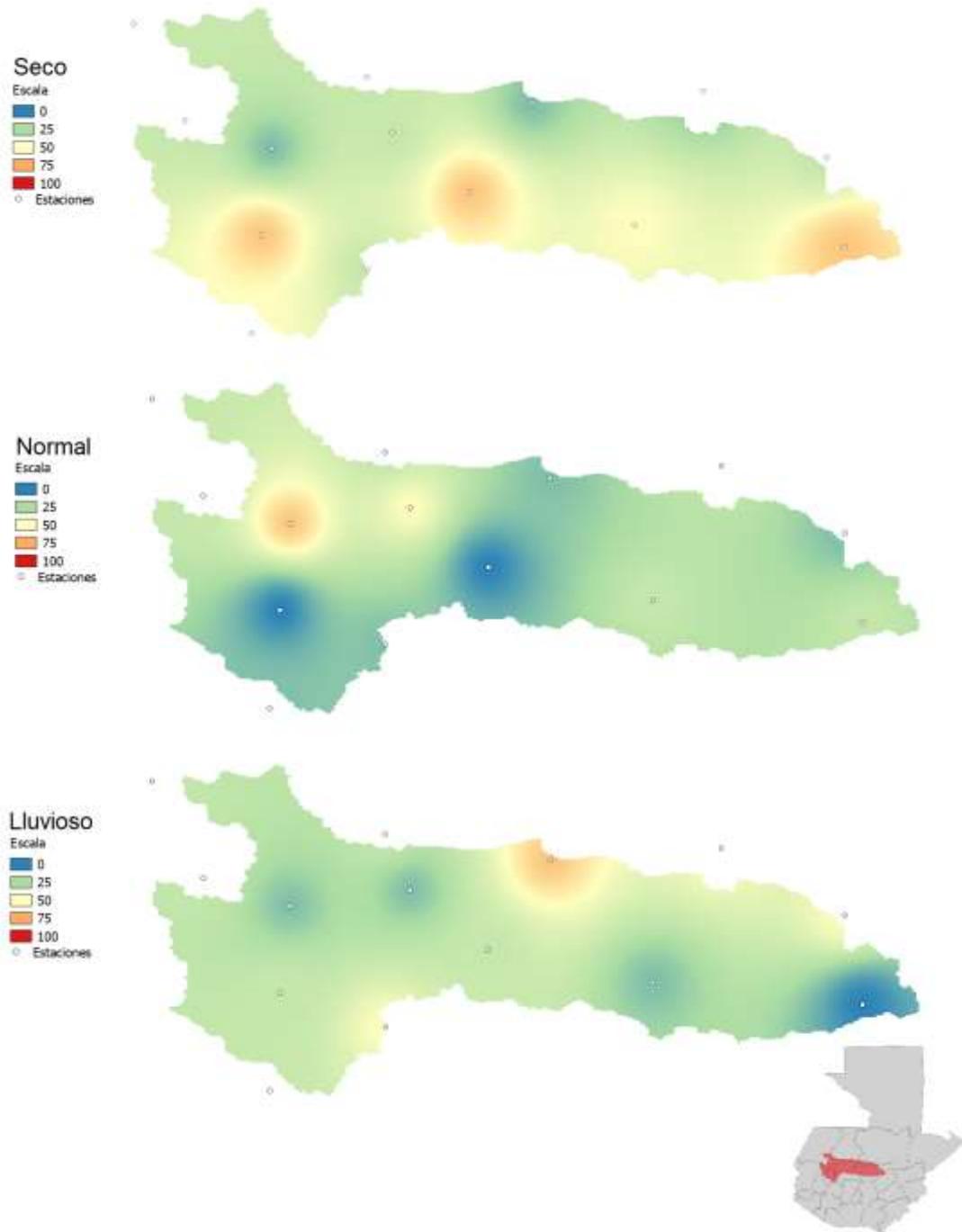
Figura 29.

Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, abril



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 30. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, abril**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Tabla VI. Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, mayo

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
Purulha	SECO	56%	27%	29%	52%	48%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	11%	36%	43%			
	LLUVIOSO	33%	36%	29%			
San Cristóbal	SECO	56%	23%	43%	7%	93%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	44%	32%	14%			
	LLUVIOSO	0%	45%	43%			
Chicamán	SECO	56%	26%	50%	43%	57%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	33%	35%	17%			
	LLUVIOSO	11%	39%	33%			
San Jerónimo	SECO	56%	18%	57%	19%	81%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	22%	36%	29%			
	LLUVIOSO	22%	45%	14%			
Cubulco	SECO	44%	32%	29%	96%	4%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	22%	36%	29%			
	LLUVIOSO	33%	32%	43%			
San Andrés	SECO	67%	23%	29%	25%	75%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	22%	36%	29%			
	LLUVIOSO	11%	41%	43%			
Chuitín	SECO	56%	27%	29%	12%	88%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	44%	27%	29%			
	LLUVIOSO	0%	45%	43%			
Nebaj	SECO	67%	14%	57%	3%	97%	DEPENDIENTE
	NORMAL	22%	41%	14%			
	LLUVIOSO	11%	45%	29%			
El Paradillo	SECO	44%	27%	43%	43%	57%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	44%	32%	14%			
	LLUVIOSO	11%	41%	43%			
Todos los Santos	SECO	56%	23%	43%	18%	82%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	33%	27%	43%			
	LLUVIOSO	11%	50%	14%			
Huehuetenango	SECO	89%	14%	29%	0%	100%	DEPENDIENTE
	NORMAL	0%	36%	57%			
	LLUVIOSO	11%	50%	14%			
Santa Cruz del Quiché	SECO	33%	27%	57%	45%	55%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	44%	27%	29%			
	LLUVIOSO	22%	45%	14%			
Xequemeyá	SECO	67%	18%	43%	10%	90%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	22%	41%	14%			
	LLUVIOSO	11%	41%	43%			
Totonicapán	SECO	56%	27%	29%	9%	91%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	44%	32%	14%			
	LLUVIOSO	0%	41%	57%			

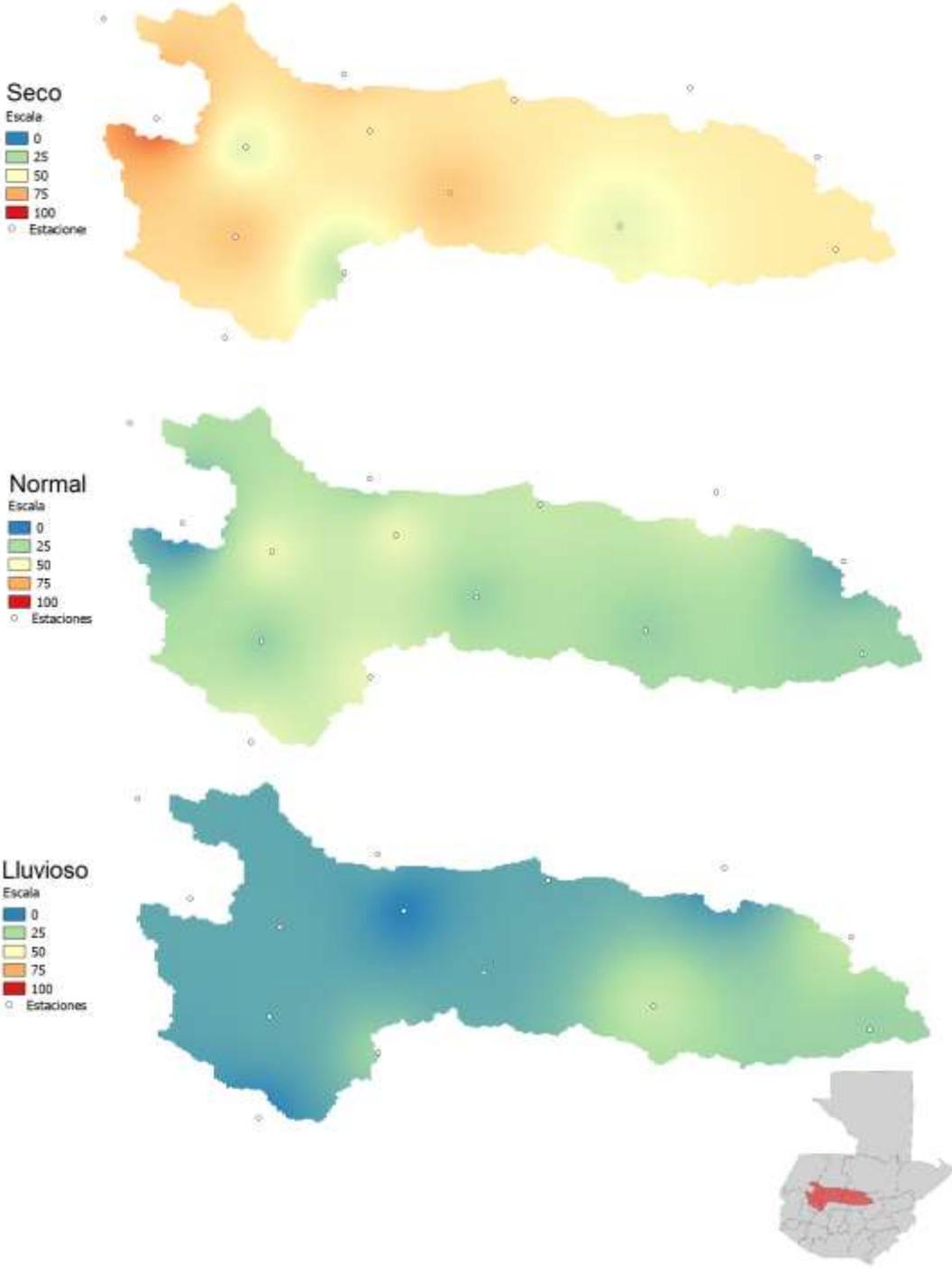
Fuente: elaboración propia.

De la tabla de contingencia realizada para mayo se obtuvo que: durante El Niño la condición seca predominó en doce de catorce estaciones, durante La Niña la condición lluviosa predominó en cuatro estaciones y durante ENSO-neutral predominó la condición lluviosa en once estaciones.

La prueba exacta de Fisher demostró, con 5 % de significancia, que existe relación entre las condiciones climáticas y la ocurrencia de eventos del ciclo ENOS en las estaciones de:

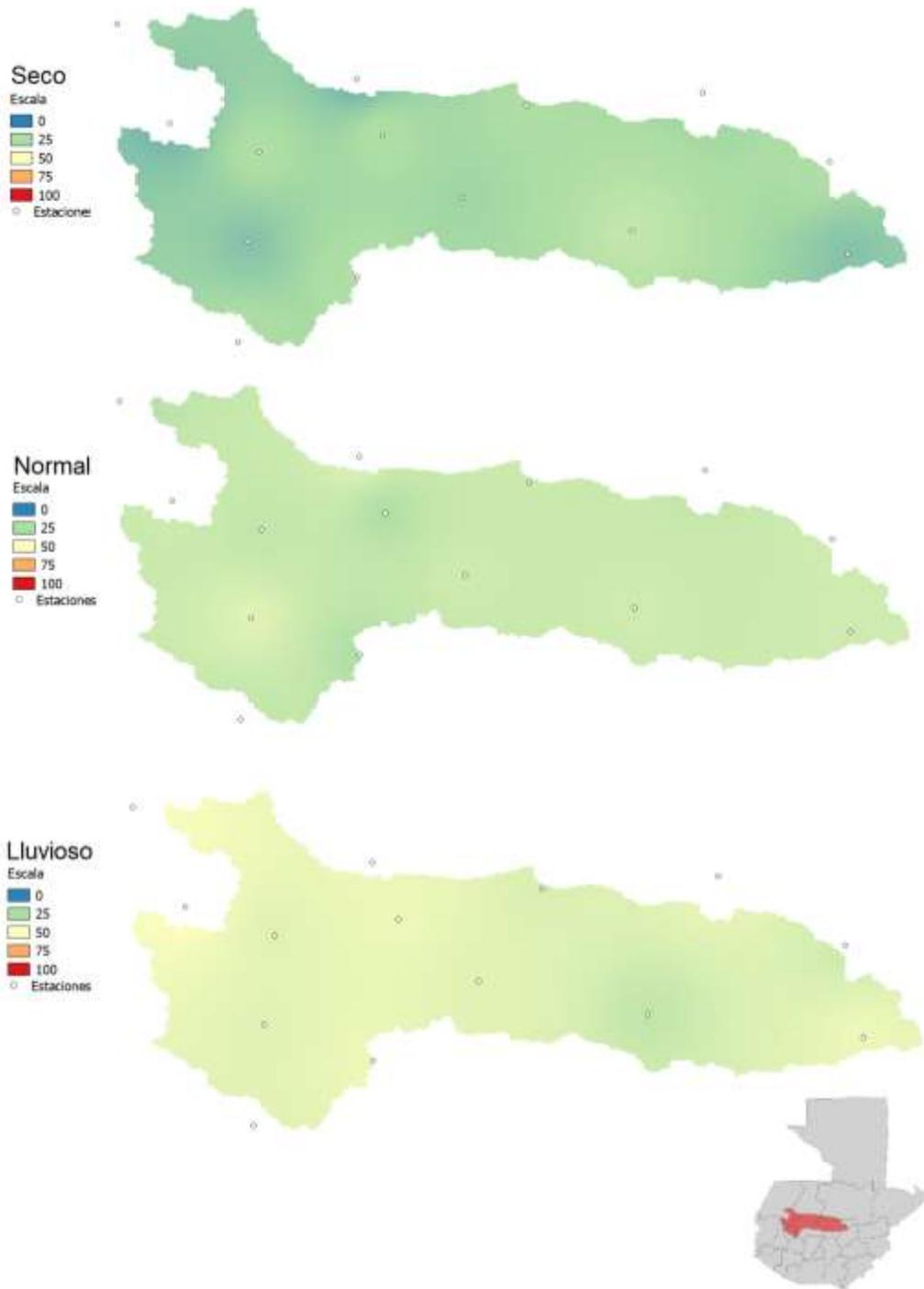
- En Nebaj, 97 % de las veces existe una condición seca predominante con una probabilidad de: 67 % y 57 % durante El Niño y La Niña, respectivamente, y 45 % de condición lluviosa durante ENSO-neutral.
- En Huehuetenango 100 % de las veces existe una probabilidad de 89 % de condición seca durante El Niño, 57 % de condición normal durante La Niña y 50 % de condición lluviosa durante ENSO-neutral.

Figura 31. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, mayo**



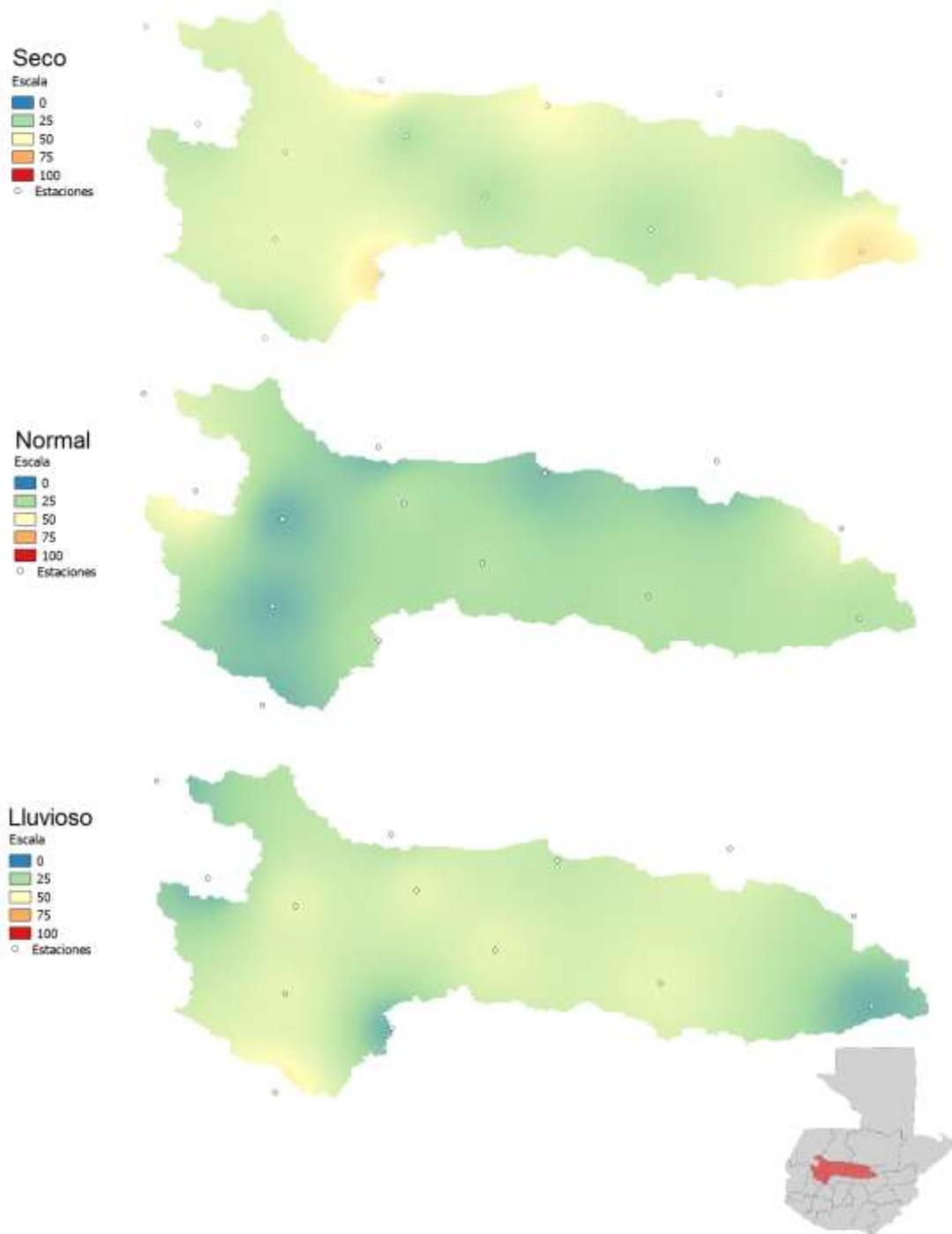
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 32. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-neutral, mayo**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 33. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, mayo**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Tabla VII. Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, junio

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
Purulha	SECO	25%	38%	33%	76%	24%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	25%	50%			
	LLUVIOSO	38%	38%	17%			
San Cristóbal	SECO	50%	29%	33%	17%	83%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	25%	25%	67%			
	LLUVIOSO	25%	46%	0%			
Chicamán	SECO	50%	25%	50%	22%	78%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	25%	29%	50%			
	LLUVIOSO	25%	46%	0%			
San Jerónimo	SECO	38%	33%	33%	95%	5%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	33%	17%			
	LLUVIOSO	25%	33%	50%			
Cubulco	SECO	0%	46%	33%	1%	99%	DEPENDIENTE
	NORMAL	13%	33%	50%			
	LLUVIOSO	88%	21%	17%			
San Andrés	SECO	50%	33%	17%	80%	20%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	25%	33%	33%			
	LLUVIOSO	25%	33%	50%			
Chuitín	SECO	63%	33%	0%	14%	86%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	25%	33%	33%			
	LLUVIOSO	13%	33%	67%			
Nebaj	SECO	50%	33%	17%	75%	25%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	25%	29%	50%			
	LLUVIOSO	25%	38%	33%			
El Paradillo	SECO	50%	29%	33%	60%	40%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	33%	17%			
	LLUVIOSO	13%	38%	50%			
Todos los Santos	SECO	25%	38%	33%	30%	70%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	38%	0%			
	LLUVIOSO	38%	25%	67%			
Huehuetenango	SECO	50%	29%	33%	68%	32%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	29%	33%			
	LLUVIOSO	13%	42%	33%			
Santa Cruz del Quiché	SECO	38%	42%	0%	30%	70%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	29%	33%			
	LLUVIOSO	25%	29%	67%			
Xequemeyá	SECO	38%	38%	17%	9%	91%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	50%	33%	0%			
	LLUVIOSO	13%	29%	83%			
Totonicapán	SECO	50%	29%	33%	68%	32%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	29%	33%			
	LLUVIOSO	13%	42%	33%			

Fuente: elaboración propia.

De la tabla de contingencia para junio se obtuvo: mayor probabilidad de condición seca (en ocho de catorce estaciones) durante El Niño, y mayor probabilidad de condición lluviosa durante La Niña (en siete de catorce estaciones) y durante ENSO-neutral (en seis de catorce estaciones).

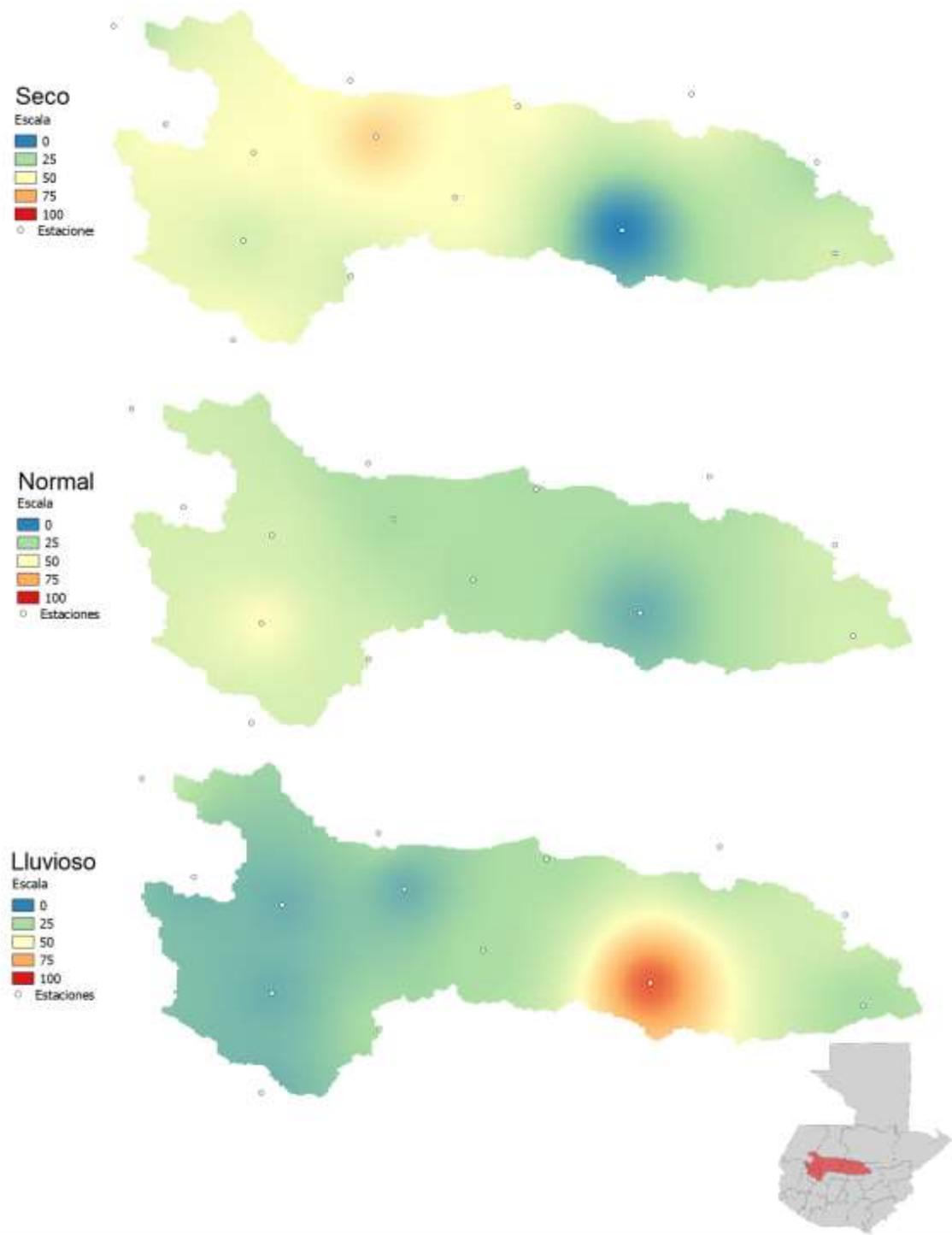
Únicamente en Cubulco la prueba exacta de Fisher demostró, con 5 % de significancia, la relación dependiente entre las condiciones climáticas y la ocurrencia de un evento del ciclo ENOS. Obteniéndose el 99 % de las veces: 88 % de probabilidad de condición lluviosa durante El Niño, 50 % de probabilidad de condición normal durante La Niña y 46 % de probabilidad de condición seca durante ENSO-neutral.

En los siguientes mapas de probabilidad de condiciones para junio, durante El Niño se observa que la condición seca predomina en la mayoría de la cuenca, exceptuando: Cubulco donde predomina la condición lluviosa y Xequemeyá, en donde predomina la condición normal.

Durante la Niña, la condición lluviosa predomina en la parte occidental de la cuenca incluyendo San Jerónimo en la parte suroriental; en la parte oriental de la cuenca predominan las condiciones seca y normal.

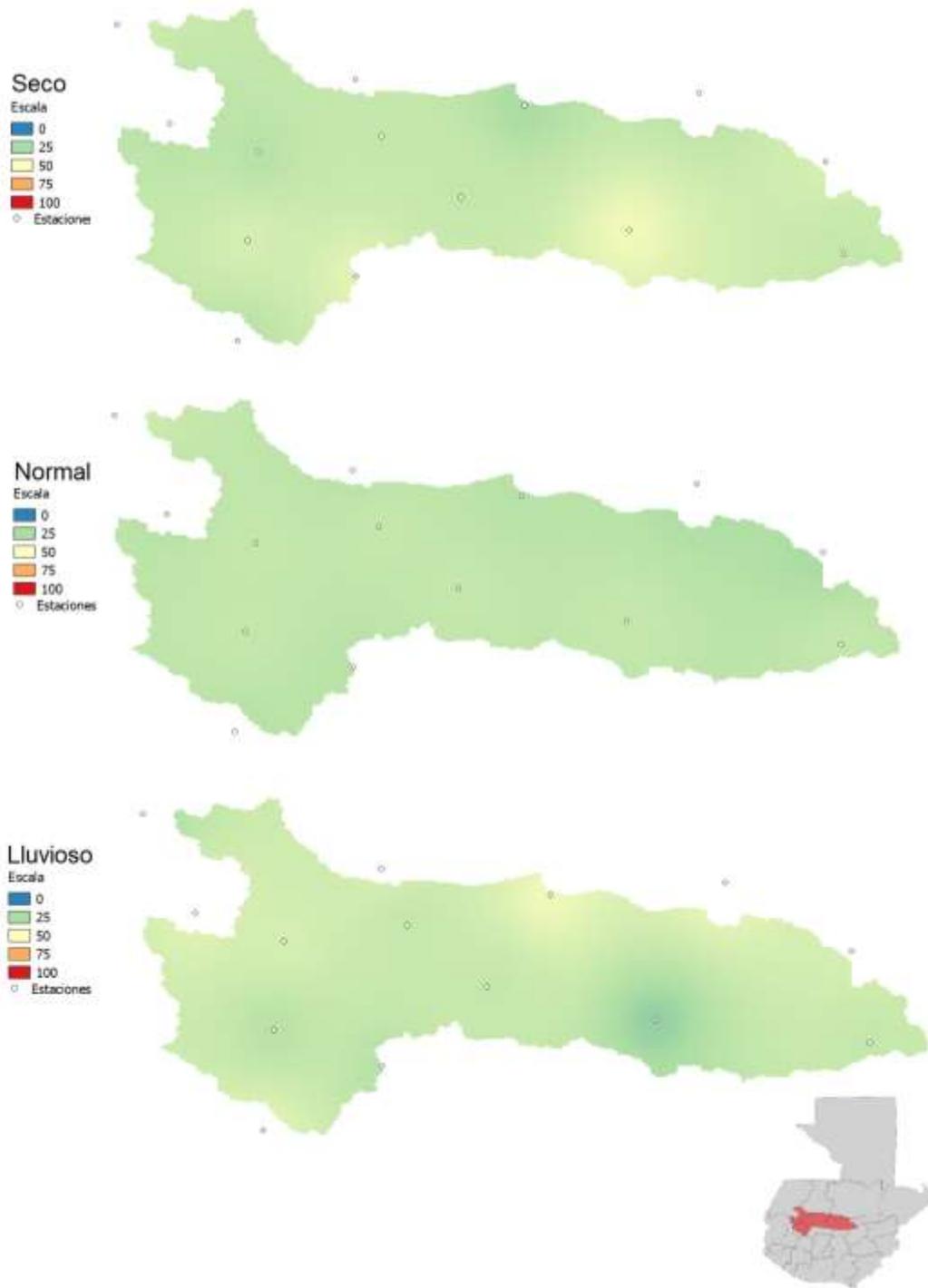
Durante ENSO-neutral, se puede observar que predominan las condiciones normales, exceptuando: Cubulco y San Jerónimo, al sur con condición seca; Chicamán, San Cristóbal, Totonicapán y Huehuetenango con condición lluviosa.

Figura 34. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, junio**



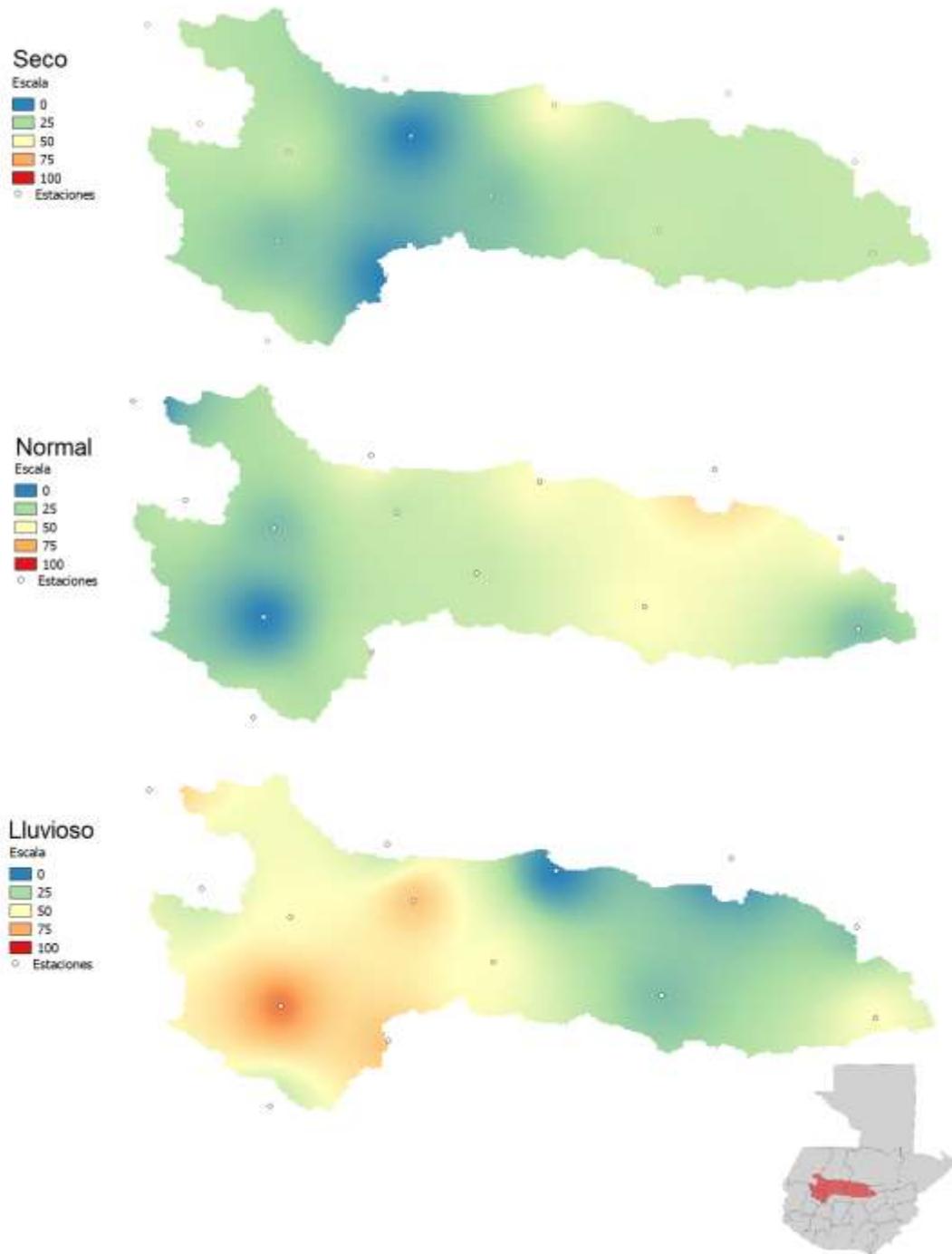
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 35. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, junio**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 36. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, junio**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Tabla VIII. Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, julio

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
Purulha	SECO	25%	41%	25%	91%	9%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	27%	38%			
	LLUVIOSO	38%	32%	38%			
San Cristóbal	SECO	38%	41%	13%	26%	74%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	50%	27%	25%			
	LLUVIOSO	13%	32%	63%			
Chicamán	SECO	50%	32%	25%	68%	32%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	27%	38%			
	LLUVIOSO	13%	41%	38%			
San Jerónimo	SECO	38%	41%	13%	68%	32%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	25%	32%	38%			
	LLUVIOSO	38%	27%	50%			
Cubulco	SECO	38%	36%	25%	75%	25%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	13%	36%	38%			
	LLUVIOSO	50%	27%	38%			
San Andrés	SECO	50%	32%	25%	68%	32%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	27%	38%			
	LLUVIOSO	13%	41%	38%			
Chuitín	SECO	63%	32%	13%	33%	67%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	25%	32%	38%			
	LLUVIOSO	13%	36%	50%			
Nebaj	SECO	38%	36%	25%	75%	25%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	23%	50%			
	LLUVIOSO	25%	41%	25%			
El Paradillo	SECO	50%	27%	38%	46%	54%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	36%	13%			
	LLUVIOSO	13%	36%	50%			
Todos los Santos	SECO	50%	36%	13%	31%	69%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	23%	50%			
	LLUVIOSO	13%	41%	38%			
Huehuetenango	SECO	38%	32%	38%	68%	32%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	50%	27%	25%			
	LLUVIOSO	13%	41%	38%			
Santa Cruz del Quiché	SECO	25%	36%	38%	86%	14%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	50%	27%	25%			
	LLUVIOSO	25%	36%	38%			
Xequemeyá	SECO	25%	41%	25%	70%	30%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	23%	50%			
	LLUVIOSO	38%	36%	25%			
Totonicapán	SECO	50%	35%	14%	51%	49%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	26%	43%			
	LLUVIOSO	13%	39%	43%			

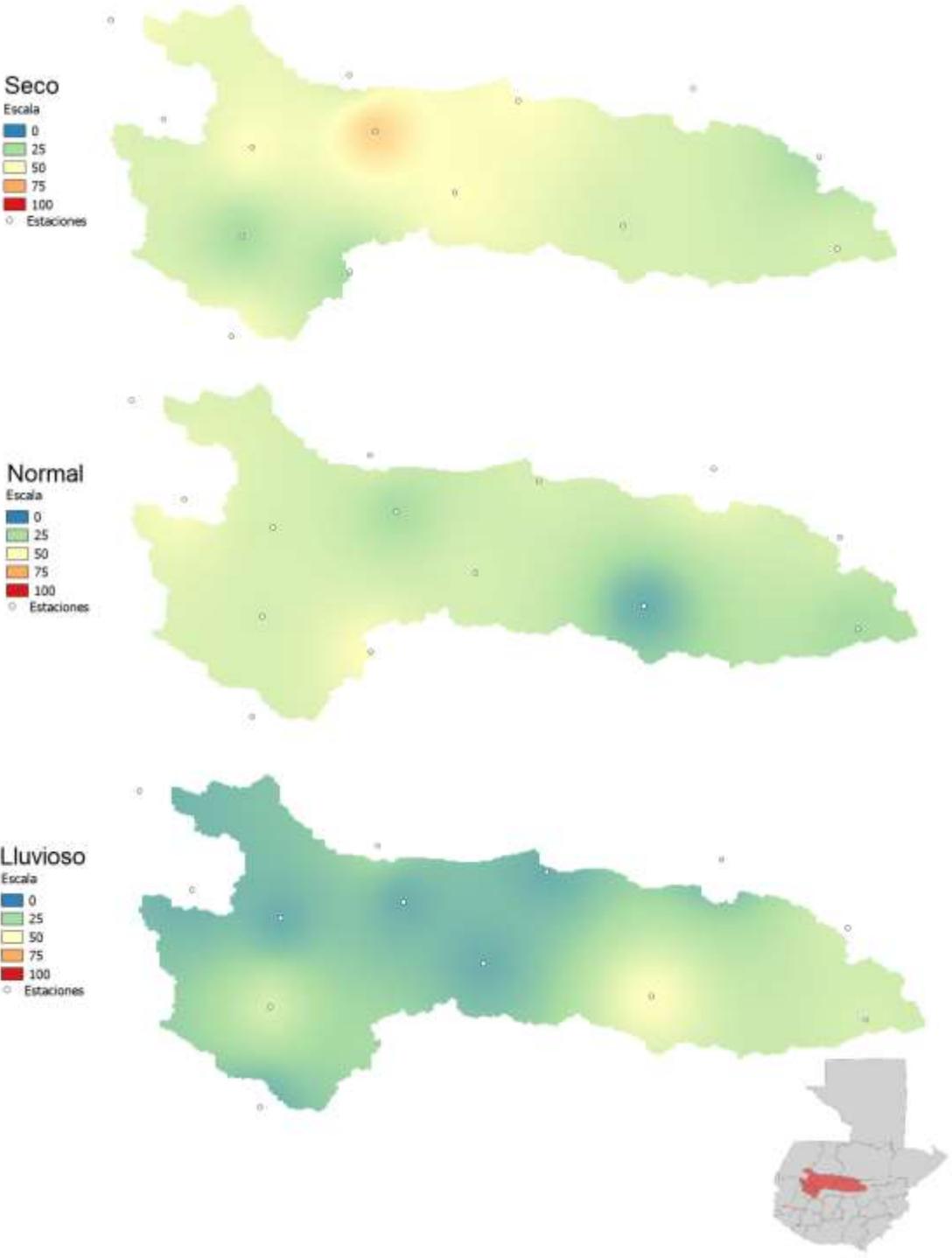
Fuente: elaboración propia.

Según la tabla de contingencia para julio se obtuvo: mayor probabilidad de condición seca (en seis de catorce estaciones) durante El Niño, y mayor probabilidad de condición lluviosa durante La Niña (en cuatro de catorce) y durante ENSO-neutral (en siete de catorce estaciones).

La prueba exacta de Fisher demostró que, para julio en todas las estaciones, la relación es independiente entre las condiciones climáticas y la ocurrencia de un evento del ciclo ENOS.

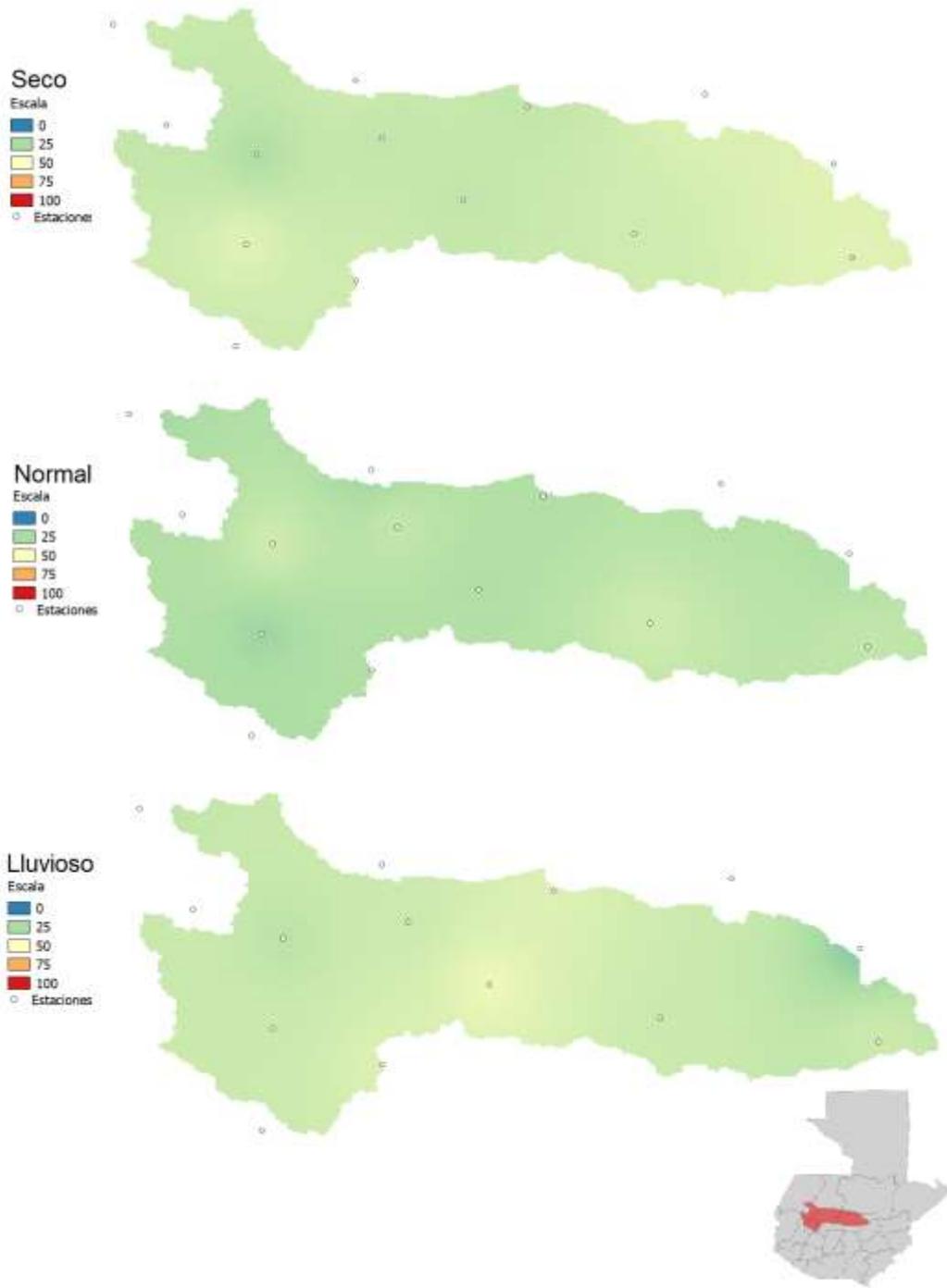
Durante El Niño, los siguientes mapas demuestran condiciones secas predominantes en la cuenca; con excepción de: Cubulco donde predomina la probabilidad de condición lluviosa, en Xequemeyá y en Purulhá existe la misma probabilidad de que se den las condiciones lluviosa o normal.

Figura 37. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, julio**



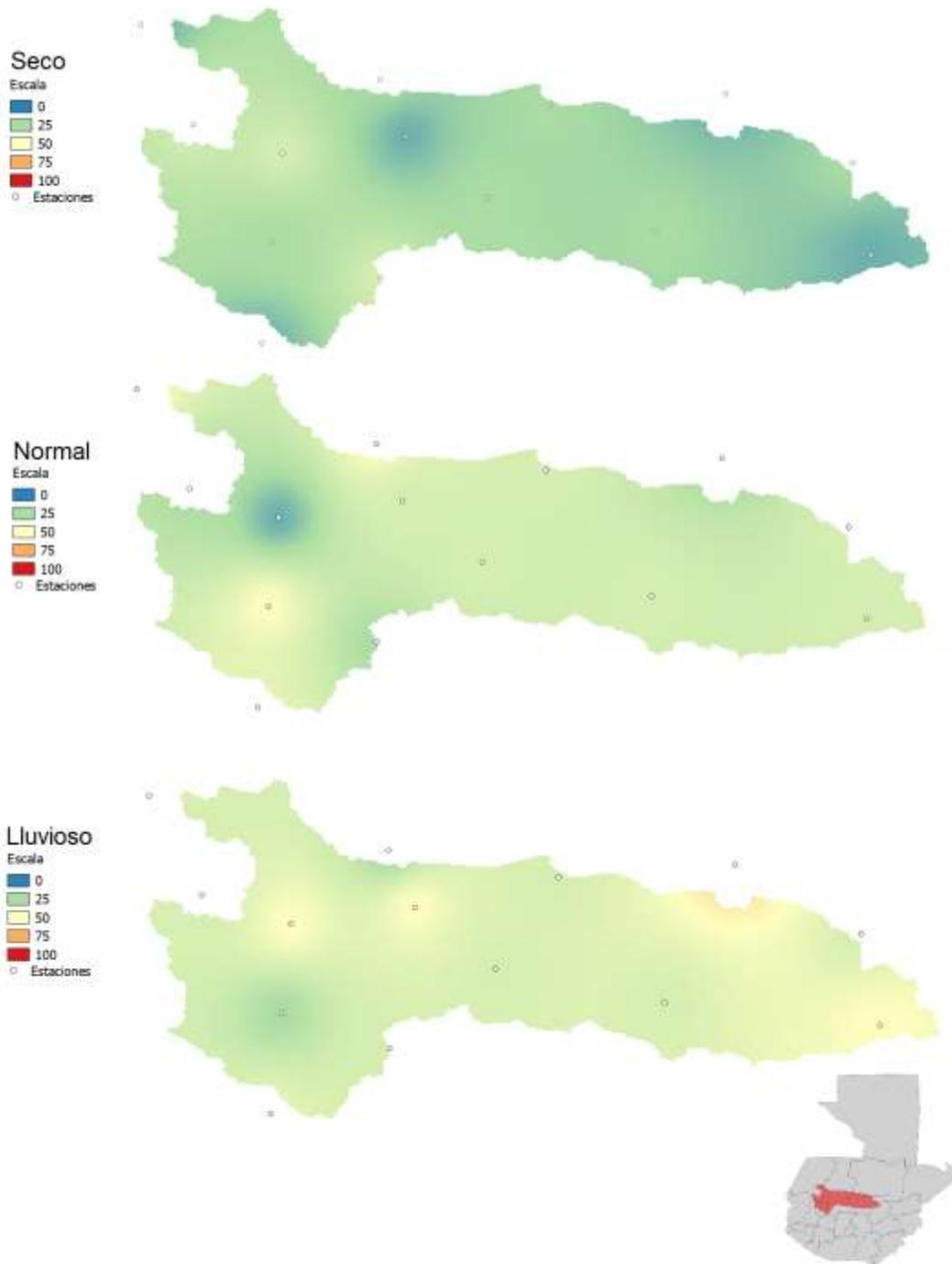
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 38. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, julio**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 39. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, julio**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Tabla IX. Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, agosto

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
Purulha	SECO	63%	30%	20%	2%	98%	DEPENDIENTE
	NORMAL	13%	50%	10%			
	LLUVIOSO	25%	20%	70%			
San Cristóbal	SECO	75%	35%	10%	4%	96%	DEPENDIENTE
	NORMAL	25%	30%	30%			
	LLUVIOSO	0%	35%	60%			
Chicamán	SECO	75%	20%	30%	4%	96%	DEPENDIENTE
	NORMAL	25%	40%	20%			
	LLUVIOSO	0%	40%	50%			
San Jerónimo	SECO	100%	20%	10%	0%	100%	DEPENDIENTE
	NORMAL	0%	45%	30%			
	LLUVIOSO	0%	35%	60%			
Cubulco	SECO	88%	30%	0%	0%	100%	DEPENDIENTE
	NORMAL	13%	35%	40%			
	LLUVIOSO	0%	35%	60%			
San Andrés	SECO	88%	30%	0%	0%	100%	DEPENDIENTE
	NORMAL	13%	25%	60%			
	LLUVIOSO	0%	45%	40%			
Chuitín	SECO	75%	20%	30%	1%	99%	DEPENDIENTE
	NORMAL	25%	45%	10%			
	LLUVIOSO	0%	35%	60%			
Nebaj	SECO	63%	30%	20%	40%	60%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	25%	35%	30%			
	LLUVIOSO	13%	35%	50%			
El Paradillo	SECO	88%	25%	10%	0%	100%	DEPENDIENTE
	NORMAL	13%	45%	20%			
	LLUVIOSO	0%	30%	70%			
Todos los Santos	SECO	100%	20%	10%	0%	100%	DEPENDIENTE
	NORMAL	0%	50%	20%			
	LLUVIOSO	0%	30%	70%			
Huehuetenango	SECO	75%	25%	20%	4%	96%	DEPENDIENTE
	NORMAL	25%	40%	20%			
	LLUVIOSO	0%	35%	60%			
Santa Cruz del Quiché	SECO	88%	30%	0%	0%	100%	DEPENDIENTE
	NORMAL	13%	30%	50%			
	LLUVIOSO	0%	40%	50%			
Xequemeyá	SECO	50%	40%	10%	28%	72%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	25%	40%			
	LLUVIOSO	13%	35%	50%			
Totonicapán	SECO	75%	30%	10%	3%	97%	DEPENDIENTE
	NORMAL	25%	35%	30%			
	LLUVIOSO	0%	35%	60%			

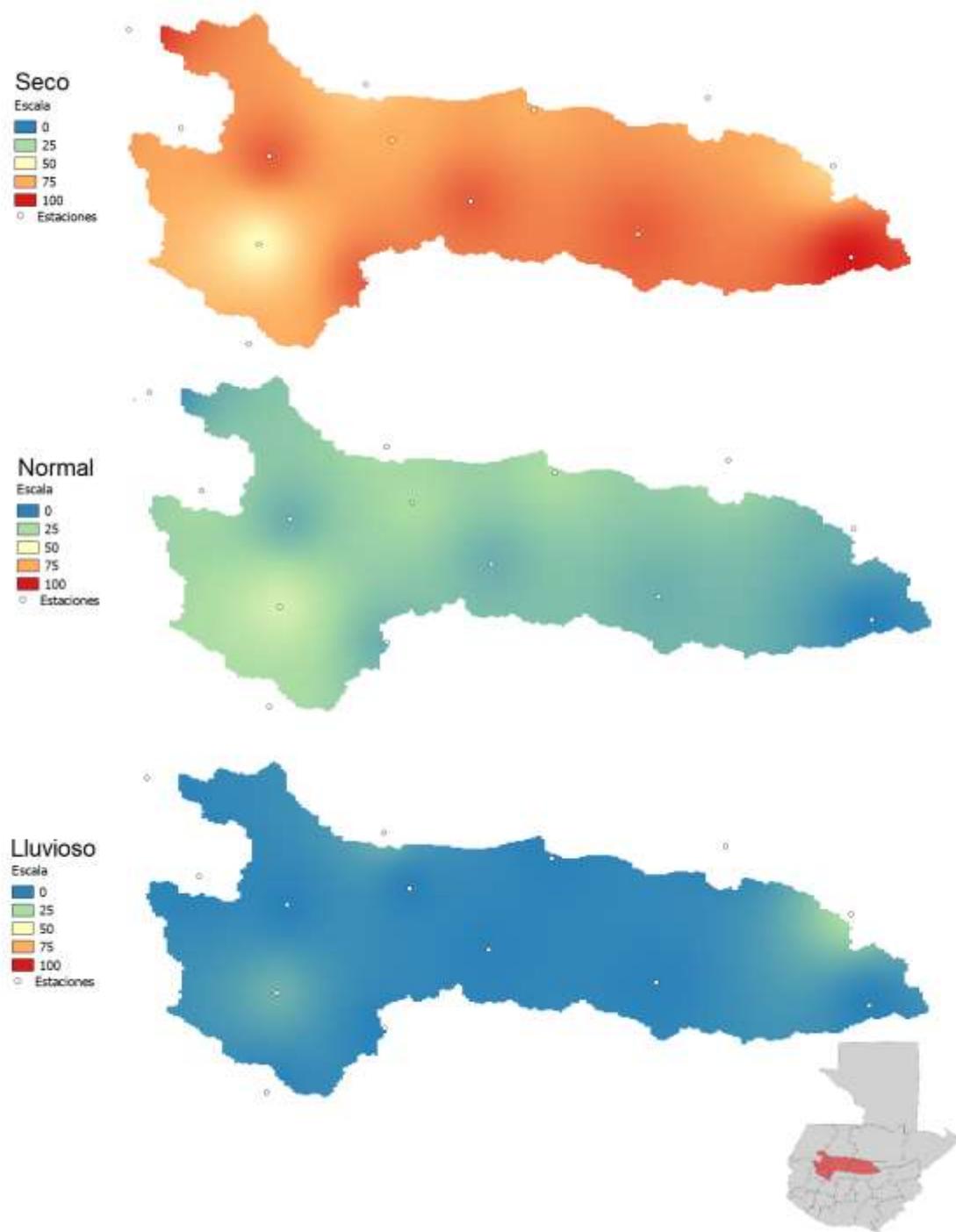
Fuente: elaboración propia.

De la tabla de contingencia se obtuvo que la condición seca predominó en las catorce estaciones de estudio, durante la ocurrencia El Niño; durante La Niña predominó la condición lluviosa en doce estaciones y durante ENSO-neutral predominó la condición normal en seis estaciones.

La prueba exacta de Fisher demostró, en doce estaciones con 5 % de significancia, que existe relación entre las condiciones climáticas y la ocurrencia de un evento del ciclo ENOS. También se obtuvieron condiciones secas predominantes el 100 % de las veces en seis de catorce estaciones.

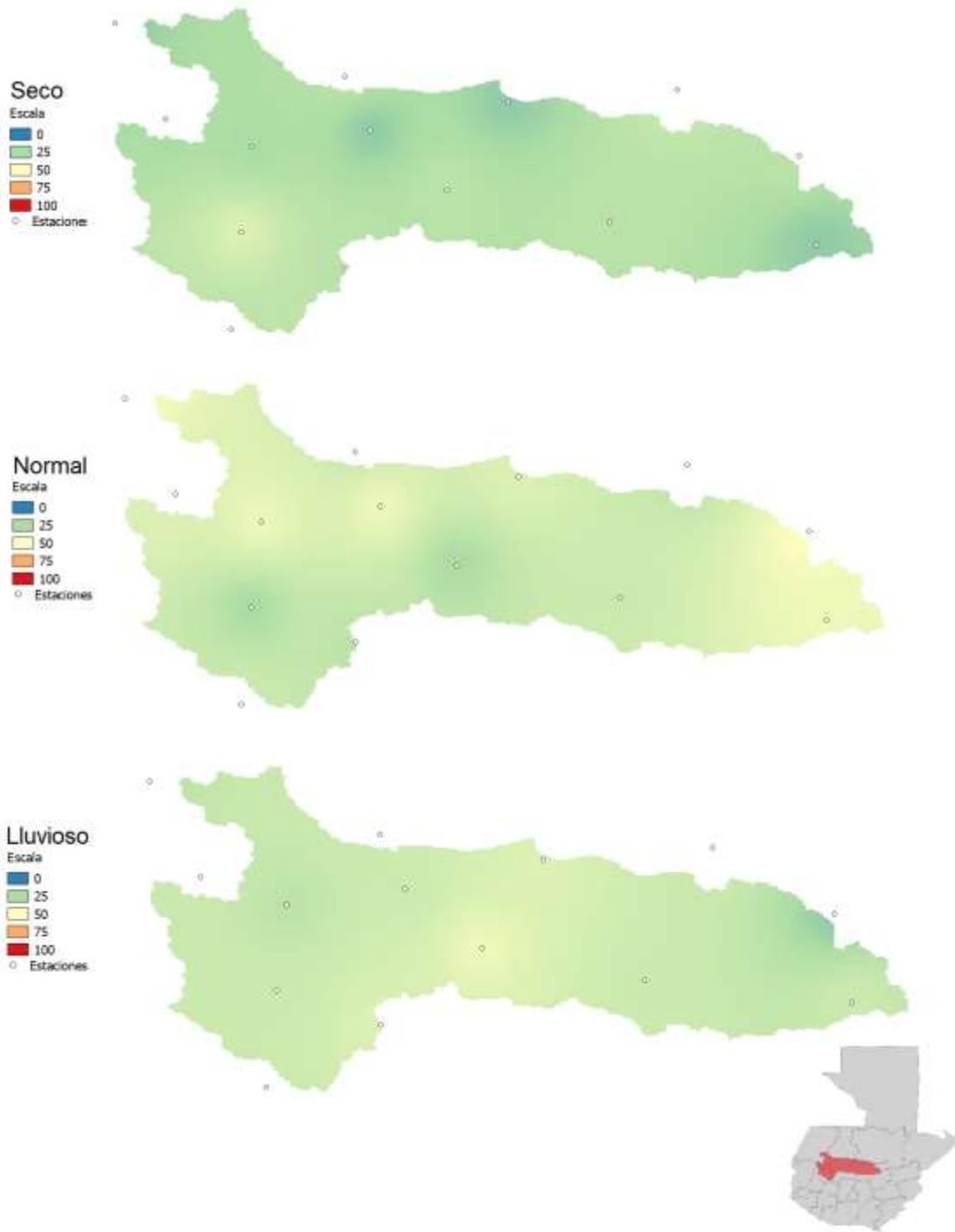
Según los mapas de probabilidad de condiciones mostrados a continuación, se obtuvieron condiciones secas predominantes en toda la cuenca durante la ocurrencia El Niño. Al ocurrir ENSO-neutral se observa un comportamiento variado. Durante La Niña se obtuvo mayor probabilidad de condición lluviosa en la mayoría de la cuenca exceptuando San Andrés donde predomina una condición normal.

Figura 40. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, agosto**



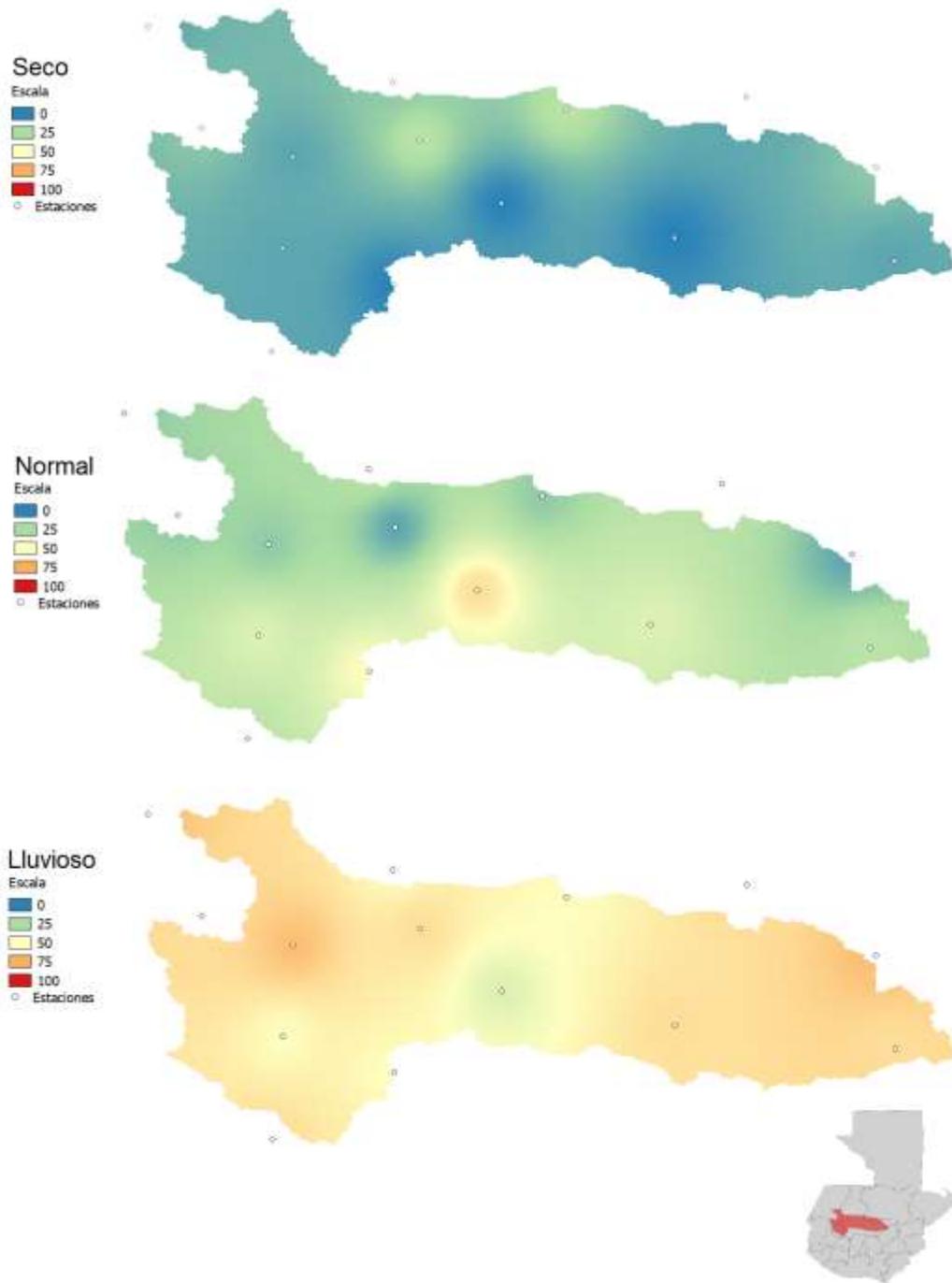
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 41. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, agosto**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 42. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, agosto**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Tabla X. Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, septiembre

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
Purulha	SECO	36%	35%	30%	90%	10%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	27%	35%	20%			
	LLUVIOSO	36%	29%	50%			
San Cristóbal	SECO	64%	29%	10%	10%	90%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	18%	41%	30%			
	LLUVIOSO	18%	29%	60%			
Chicamán	SECO	55%	35%	10%	3%	97%	DEPENDIENTE
	NORMAL	36%	47%	20%			
	LLUVIOSO	9%	18%	70%			
San Jerónimo	SECO	55%	35%	10%	29%	71%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	27%	29%	40%			
	LLUVIOSO	18%	35%	50%			
Cubulco	SECO	55%	25%	27%	56%	44%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	27%	31%	36%			
	LLUVIOSO	18%	44%	36%			
San Andrés	SECO	64%	18%	30%	6%	94%	DEPENDIENTE
	NORMAL	9%	53%	20%			
	LLUVIOSO	27%	29%	50%			
Chuitín	SECO	36%	41%	20%	37%	63%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	45%	29%	20%			
	LLUVIOSO	18%	29%	60%			
Nebaj	SECO	45%	35%	20%	75%	25%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	27%	35%	30%			
	LLUVIOSO	27%	29%	50%			
El Paradillo	SECO	45%	24%	40%	35%	65%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	36%	41%	10%			
	LLUVIOSO	18%	35%	50%			
Todos los Santos	SECO	36%	41%	20%	13%	87%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	55%	24%	20%			
	LLUVIOSO	9%	35%	60%			
Huehuetenango	SECO	55%	29%	20%	48%	52%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	27%	35%	30%			
	LLUVIOSO	18%	35%	50%			
Santa Cruz del Quiché	SECO	45%	24%	40%	49%	51%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	18%	47%	20%			
	LLUVIOSO	36%	29%	40%			
Xequemeyá	SECO	45%	35%	20%	12%	88%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	36%	41%	10%			
	LLUVIOSO	18%	24%	70%			
Tonicapán	SECO	36%	35%	30%	100%	0%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	27%	35%	30%			
	LLUVIOSO	36%	29%	40%			

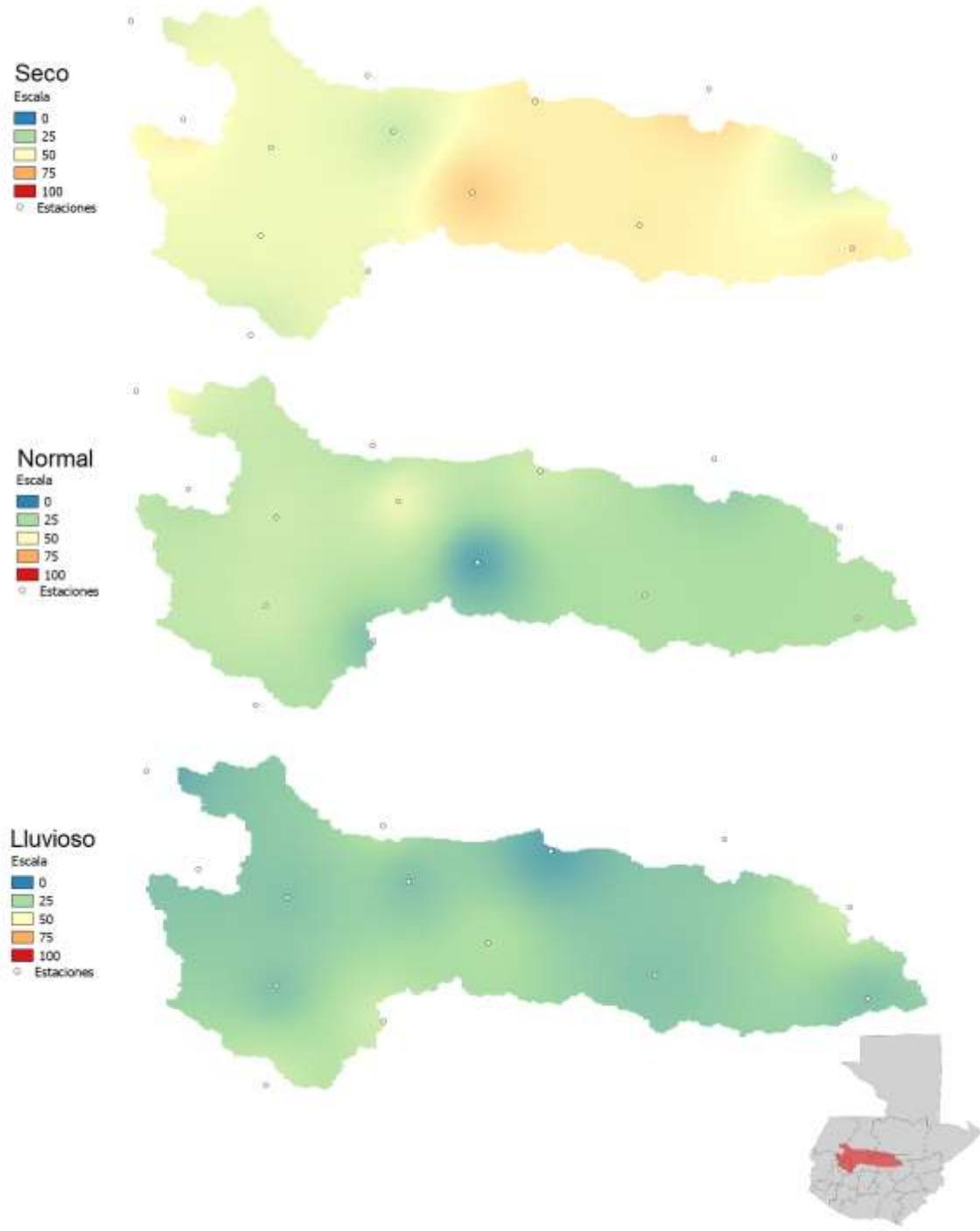
Fuente: elaboración propia.

Según la tabla de contingencia para septiembre se obtienen los siguientes resultados: predominó la condición seca durante El Niño (en diez estaciones), durante La Niña predominó la condición lluviosa (en doce estaciones) y durante ENSO-neutral predominó la condición normal (en seis estaciones).

La prueba exacta de Fisher demostró que, con 5 % de significancia, existe relación entre las condiciones climáticas y la ocurrencia de eventos del ciclo ENOS, en Chicamán y San Andrés. En la primera estación, el 97 % de las veces existe una probabilidad de: 55 % de condición seca durante El Niño, 70 % de condición lluviosa durante La Niña y 47 % de condición normal durante ENSO-neutral. En la segunda estación, el 94 % de las veces existe una probabilidad de: 64% de condición seca durante El Niño, 50 % de condición lluviosa durante La Niña y 53% de condición normal durante ENSO-neutral.

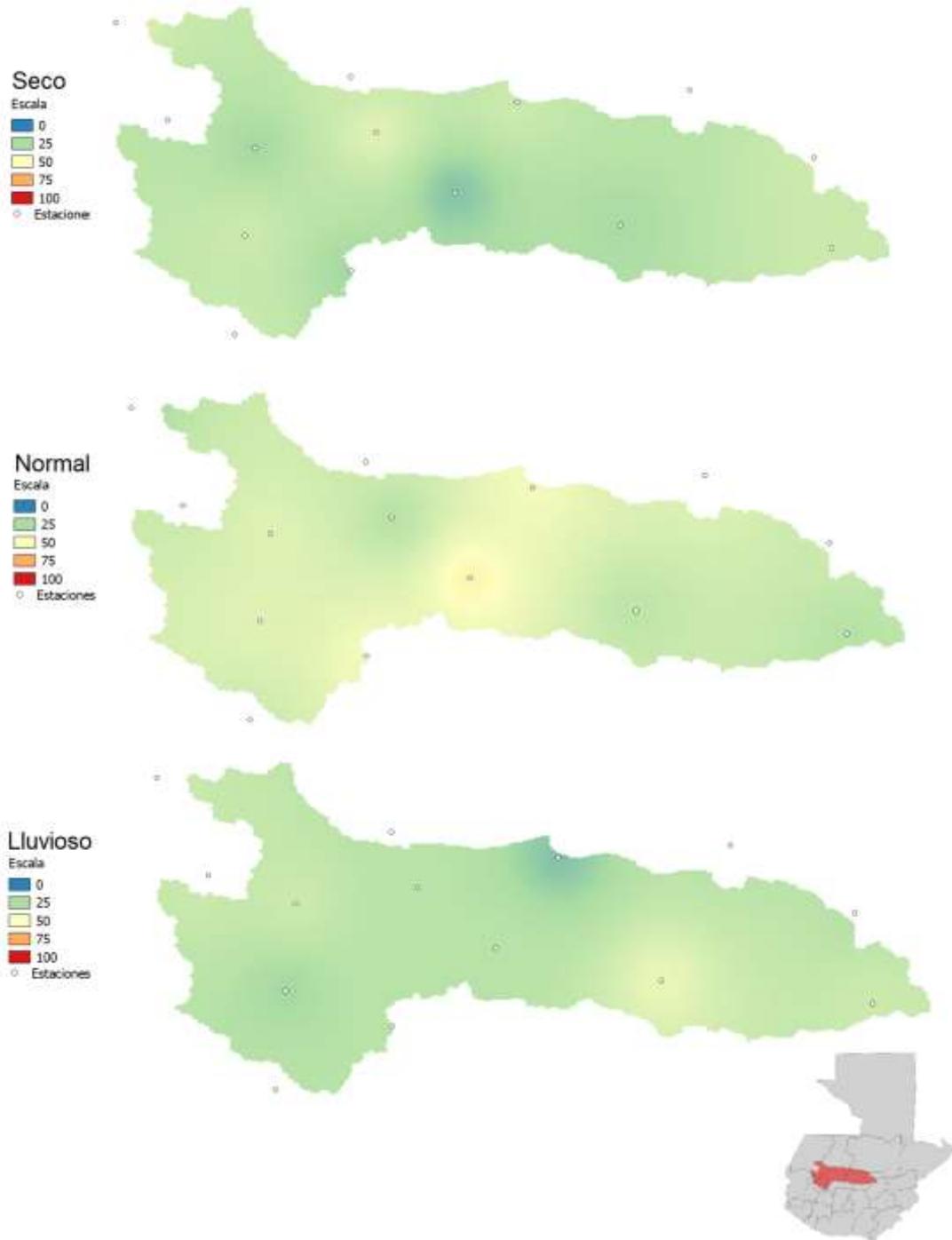
De los siguientes mapas de probabilidad de condiciones para septiembre; se puede observar una condición seca en Chicamán, San Cristóbal, San Andrés, Cubulco y San Jerónimo. Durante ENSO-neutral las condiciones normales predominan al centro de la cuenca en San Andrés. Por último, durante La Niña, las condiciones lluviosas predominan en la mayoría de la cuenca exceptuando Cubulco, Santa Cruz del Quiché, Totonicapán y Huehuetenango.

Figura 43. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, septiembre**



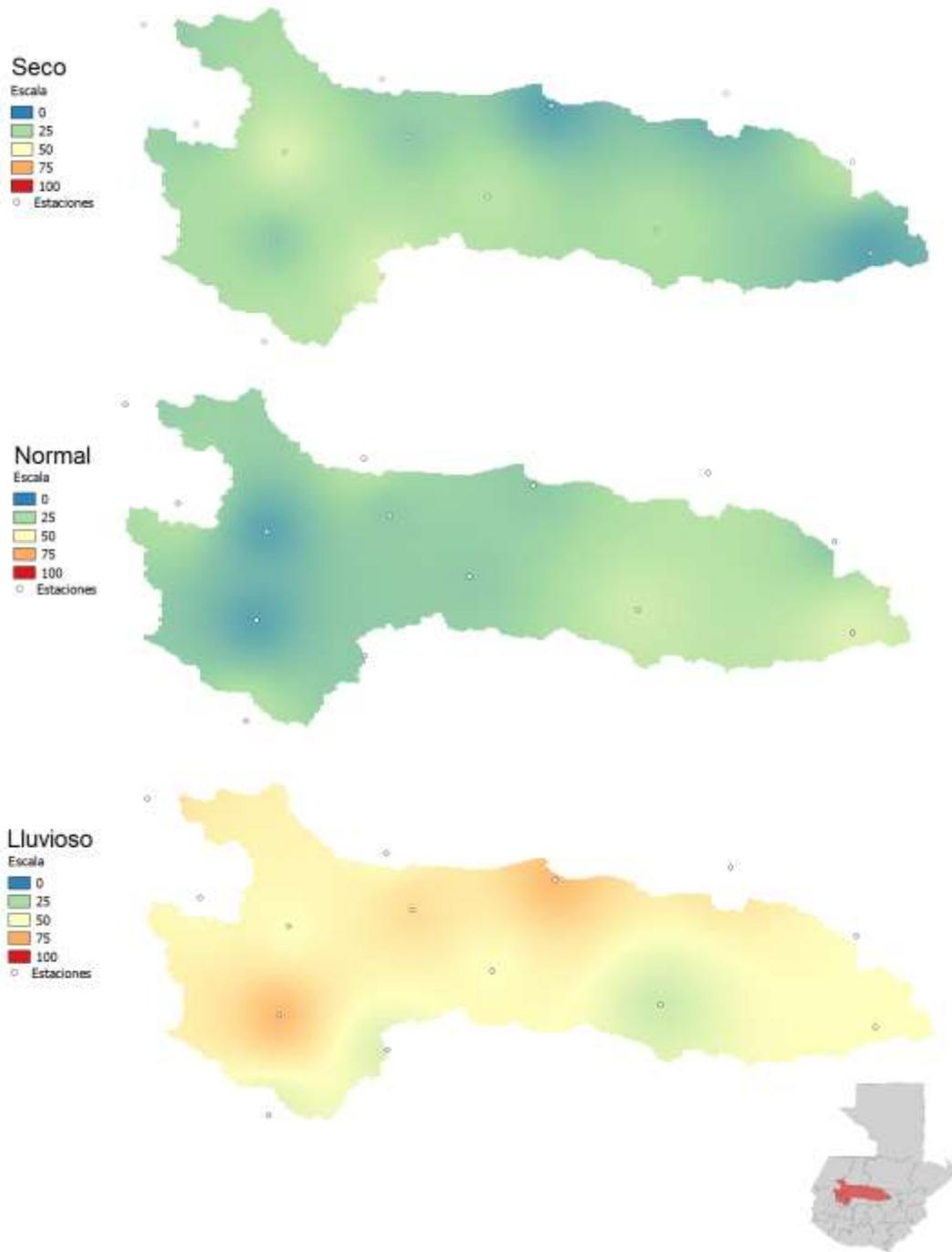
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 44. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-Neutral, septiembre**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 45. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, septiembre**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Tabla XI. Probabilidad de ocurrencia de ENSO-neutral para precipitación, octubre

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
Purulha	SECO	42%	20%	45%	28%	72%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	33%	47%	9%			
	LLUVIOSO	25%	33%	45%			
San Cristóbal	SECO	50%	27%	27%	1%	99%	DEPENDIENTE
	NORMAL	50%	33%	9%			
	LLUVIOSO	0%	40%	64%			
Chicamán	SECO	42%	33%	27%	7%	93%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	50%	33%	9%			
	LLUVIOSO	8%	33%	64%			
San Jerónimo	SECO	42%	33%	27%	15%	85%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	42%	40%	9%			
	LLUVIOSO	17%	27%	64%			
Cubulco	SECO	42%	40%	18%	12%	88%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	50%	20%	27%			
	LLUVIOSO	8%	40%	55%			
San Andrés	SECO	42%	27%	36%	26%	74%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	42%	40%	9%			
	LLUVIOSO	17%	33%	55%			
Chuitín	SECO	50%	33%	27%	49%	51%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	25%	40%	18%			
	LLUVIOSO	25%	27%	55%			
Nebaj	SECO	58%	20%	27%	10%	90%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	33%	40%	18%			
	LLUVIOSO	8%	40%	55%			
El Paradillo	SECO	42%	27%	36%	95%	5%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	33%	33%	27%			
	LLUVIOSO	25%	40%	36%			
Todos los Santos	SECO	50%	27%	27%	52%	48%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	33%	27%	36%			
	LLUVIOSO	17%	47%	36%			
Huehuetenango	SECO	25%	27%	55%	36%	64%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	42%	40%	9%			
	LLUVIOSO	33%	33%	36%			
Santa Cruz del Quiché	SECO	42%	33%	27%	66%	34%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	42%	27%	27%			
	LLUVIOSO	17%	40%	45%			
Xequemeyá	SECO	25%	40%	36%	79%	21%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	42%	20%	36%			
	LLUVIOSO	33%	40%	27%			
Tonicapán	SECO	25%	33%	45%	16%	84%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	58%	27%	9%			
	LLUVIOSO	17%	40%	45%			

Fuente: elaboración propia.

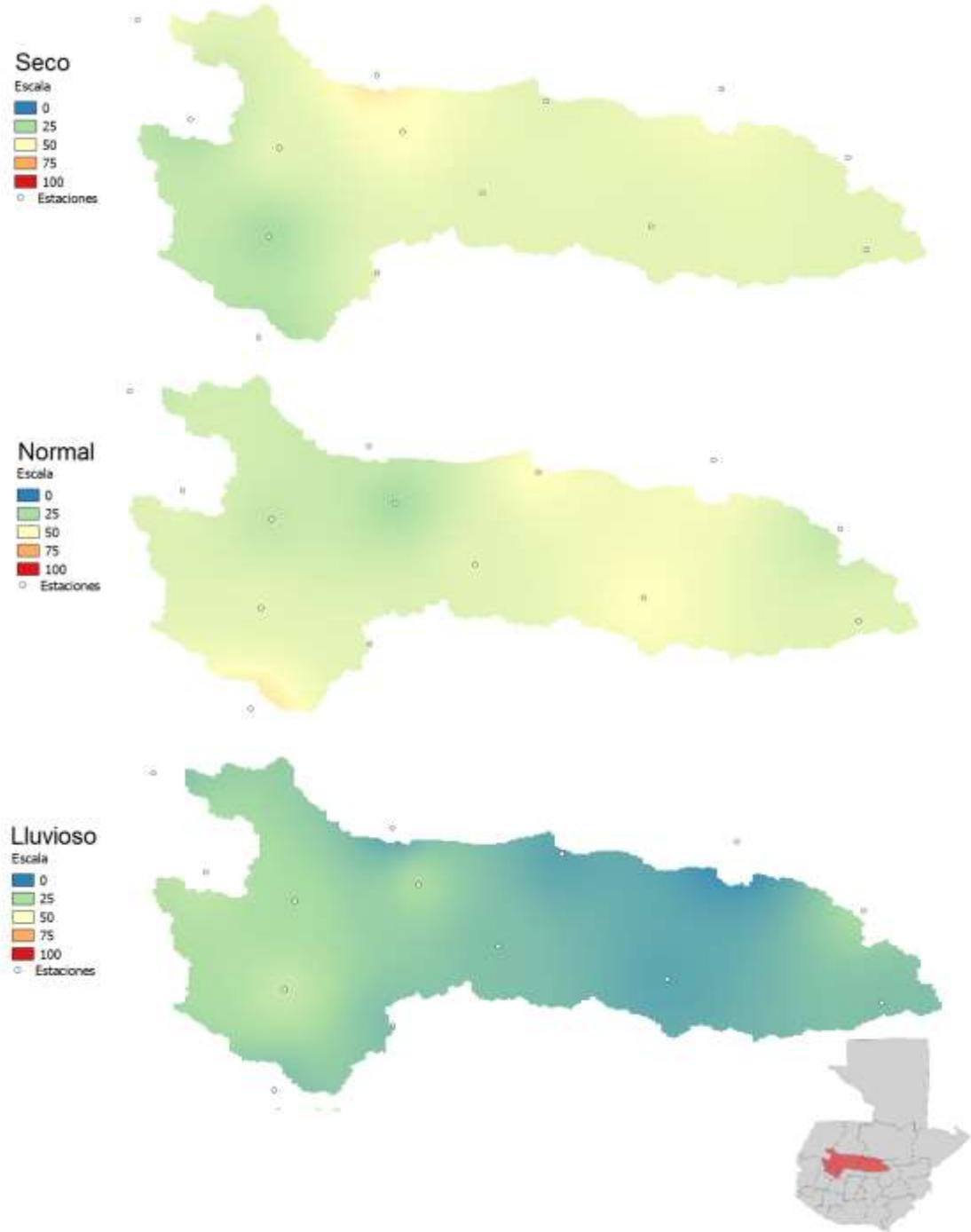
De la tabla de contingencia realizada para octubre se obtuvieron los siguientes resultados: durante El Niño predominó en la misma cantidad de estaciones la condición seca y la condición normal; así mismo, durante ENSO-neutral predominó en el mismo número de estaciones la condición normal y la condición lluviosa; sin embargo, durante La Niña la condición lluviosa predominó en ocho de catorce estaciones.

La prueba exacta de Fisher demostró, con 5 % de significancia, que existe relación entre las condiciones climáticas y la ocurrencia de eventos del ciclo ENOS únicamente en San Cristóbal. Donde el 99 % de las veces existe la probabilidad de 64 % y 40 % de condición lluviosa durante La Niña y ENSO-neutral, respectivamente. Sin embargo, durante El Niño existe 50 % de probabilidad de condición seca y 50 % de condición normal.

De acuerdo con los mapas de probabilidad de condiciones para octubre, mostrados a continuación, se obtuvo condiciones secas durante El Niño sobre toda la cuenca; excepto en la parte suroccidente de la cuenca en Huehuetenango, Xequemeyá y Totonicapán.

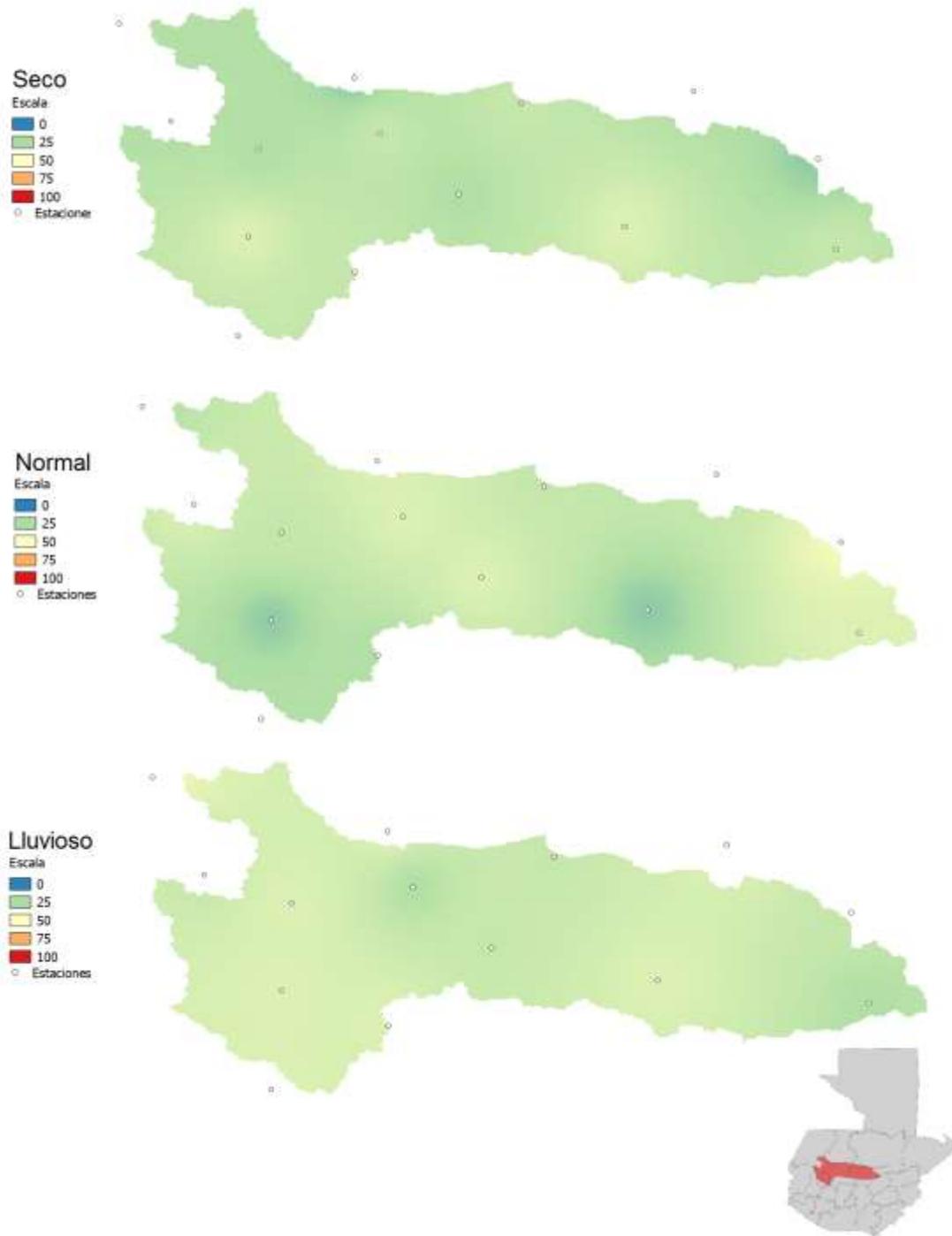
Durante La Niña se obtuvo condición lluviosa en toda la cuenca con excepción del lado occidental de la cuenca. Durante ENSO-neutral se obtuvo condición normal en Nebaj, Chuitín, San Andrés, Purulhá y San Jerónimo.

Figura 46. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, octubre**



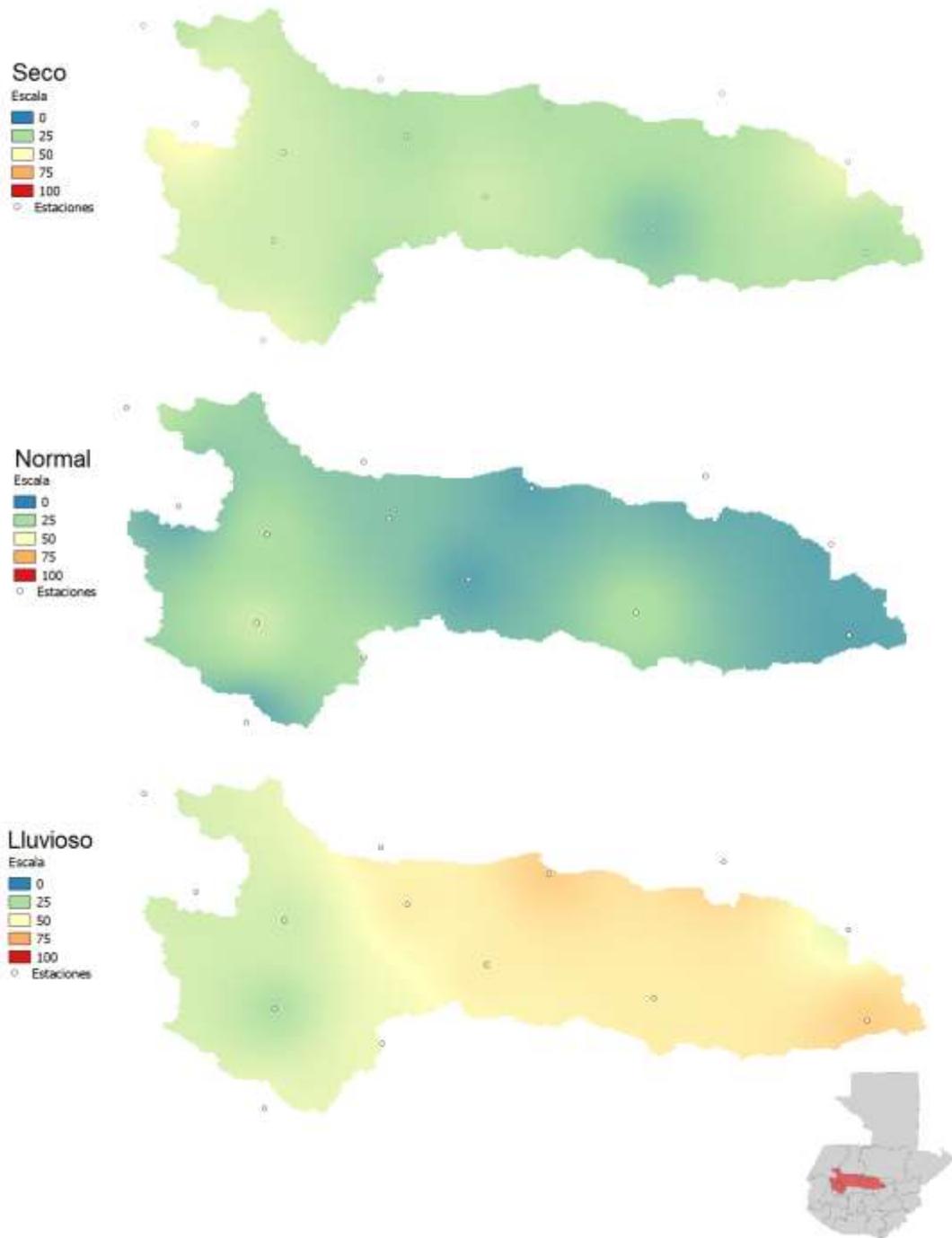
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 47. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-neutral, octubre**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 48. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, octubre**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Tabla XII. Probabilidad de ocurrencia del ciclo ENOS para precipitación, noviembre

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
Purulha	SECO	31%	33%	38%	63%	37%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	17%	38%			
	LLUVIOSO	31%	50%	23%			
San Cristóbal	SECO	38%	33%	31%	75%	25%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	23%	25%	46%			
	LLUVIOSO	38%	42%	23%			
Chicamán	SECO	38%	50%	15%	2%	98%	DEPENDIENTE
	NORMAL	31%	0%	62%			
	LLUVIOSO	31%	50%	23%			
San Jerónimo	SECO	15%	42%	46%	46%	54%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	25%	31%			
	LLUVIOSO	46%	33%	23%			
Cubulco	SECO	31%	33%	38%	63%	37%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	17%	38%			
	LLUVIOSO	31%	50%	23%			
San Andrés	SECO	46%	17%	38%	51%	49%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	23%	50%	23%			
	LLUVIOSO	31%	33%	38%			
Chuitín	SECO	23%	33%	46%	75%	25%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	31%	33%	31%			
	LLUVIOSO	46%	33%	23%			
Nebaj	SECO	23%	33%	46%	75%	25%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	25%	31%			
	LLUVIOSO	38%	42%	23%			
El Paradillo	SECO	23%	33%	46%	22%	78%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	46%	42%	8%			
	LLUVIOSO	31%	25%	46%			
Todos los Santos	SECO	15%	42%	46%	46%	54%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	38%	33%	23%			
	LLUVIOSO	46%	25%	31%			
Huehuetenango	SECO	38%	25%	38%	88%	12%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	23%	42%	31%			
	LLUVIOSO	38%	33%	31%			
Santa Cruz del Quiché	SECO	23%	33%	46%	75%	25%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	31%	33%	31%			
	LLUVIOSO	46%	33%	23%			
Xequemeyá	SECO	38%	17%	46%	22%	78%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	23%	58%	15%			
	LLUVIOSO	38%	25%	38%			
Totonicapán	SECO	31%	25%	46%	86%	14%	INDEPENDIENTE
	NORMAL	31%	33%	31%			
	LLUVIOSO	38%	42%	23%			

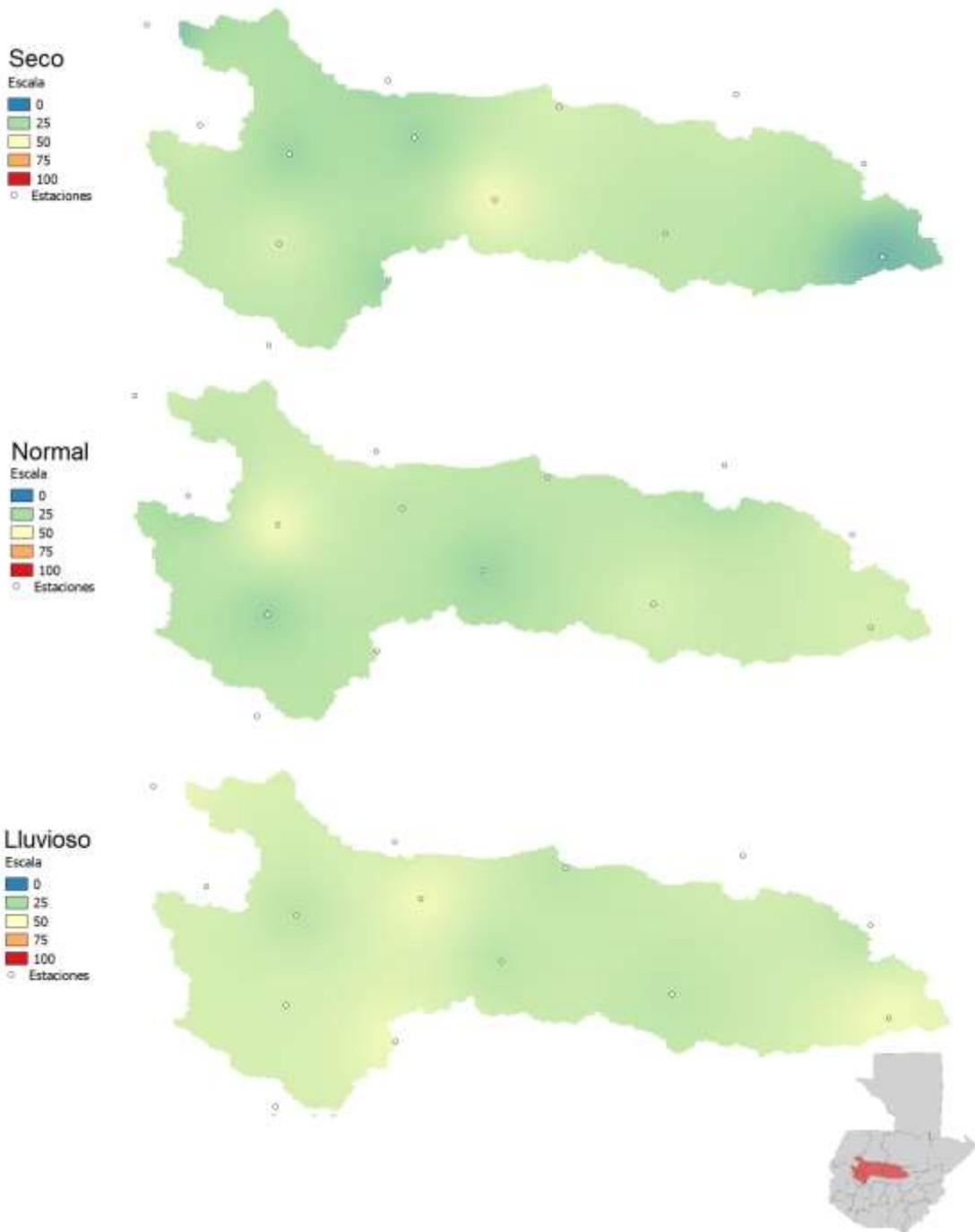
Fuente: elaboración propia.

Según la tabla de contingencia realizada para noviembre: durante El Niño la condición seca predominó en dos de catorce estaciones, durante La Niña la condición lluviosa predominó en una estación y durante ENSO-neutral la condición normal predominó en cuatro estaciones.

La prueba exacta de Fisher demostró la relación entre las condiciones climáticas y la ocurrencia de eventos del ciclo ENOS, únicamente en Chicamán. Donde el 98 % de las veces existe la probabilidad de: 38 % de condiciones secas durante El Niño, 62 % de condición normal durante La Niña, y 50 % de condición seca y 50 % de condición lluviosa durante ENSO-neutral.

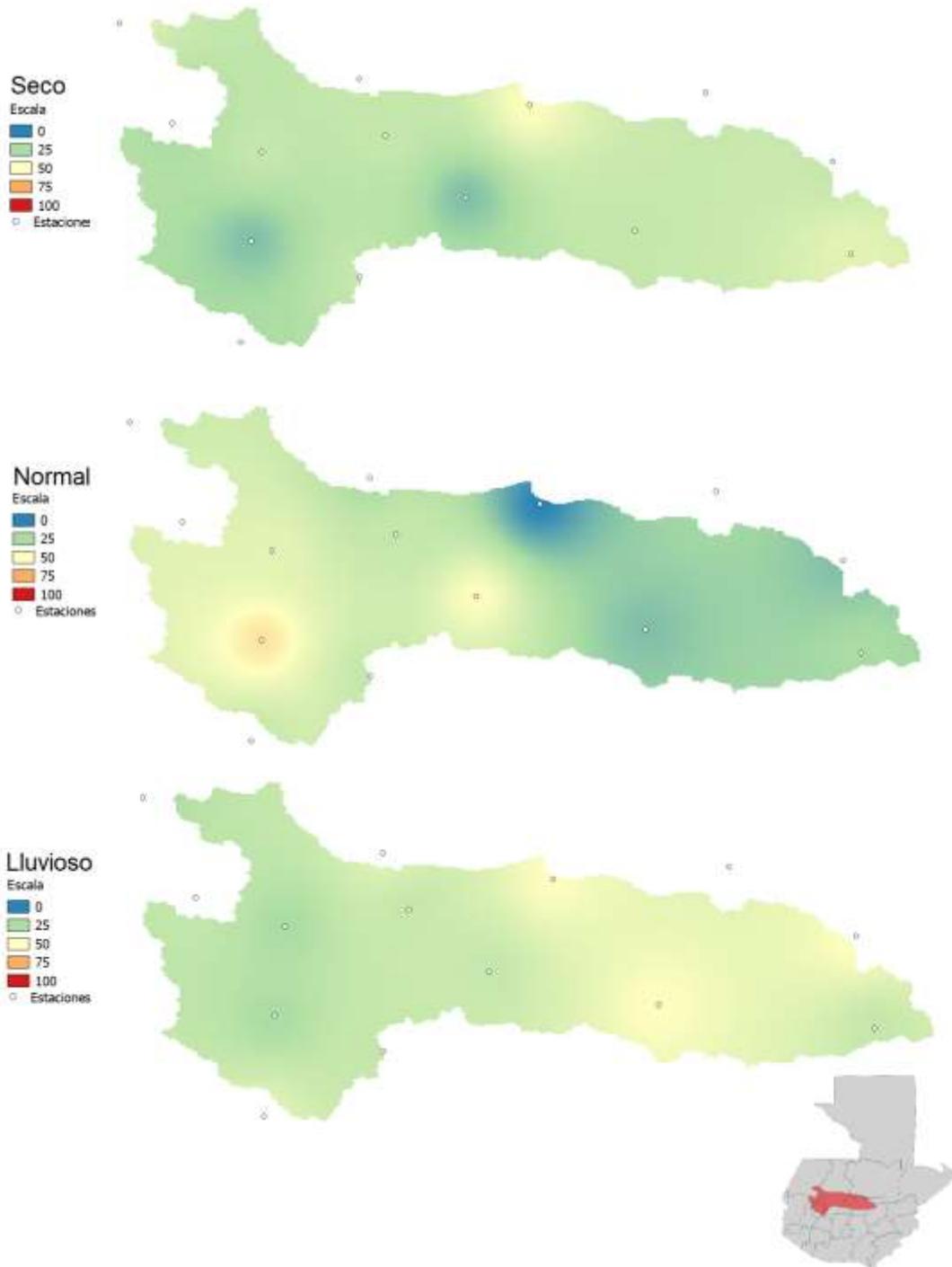
Según los siguientes mapas: durante El Niño la región central de la cuenca se ve más afectada por con condiciones secas; durante La Niña las condiciones lluviosas afectan a la parte occidental de la cuenca, incluyendo San Andrés; y durante ENSO-neutral las condiciones normales suelen ser recurrentes en la parte oriental de la cuenca, con excepción de San Jerónimo.

Figura 49. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante El Niño, noviembre**



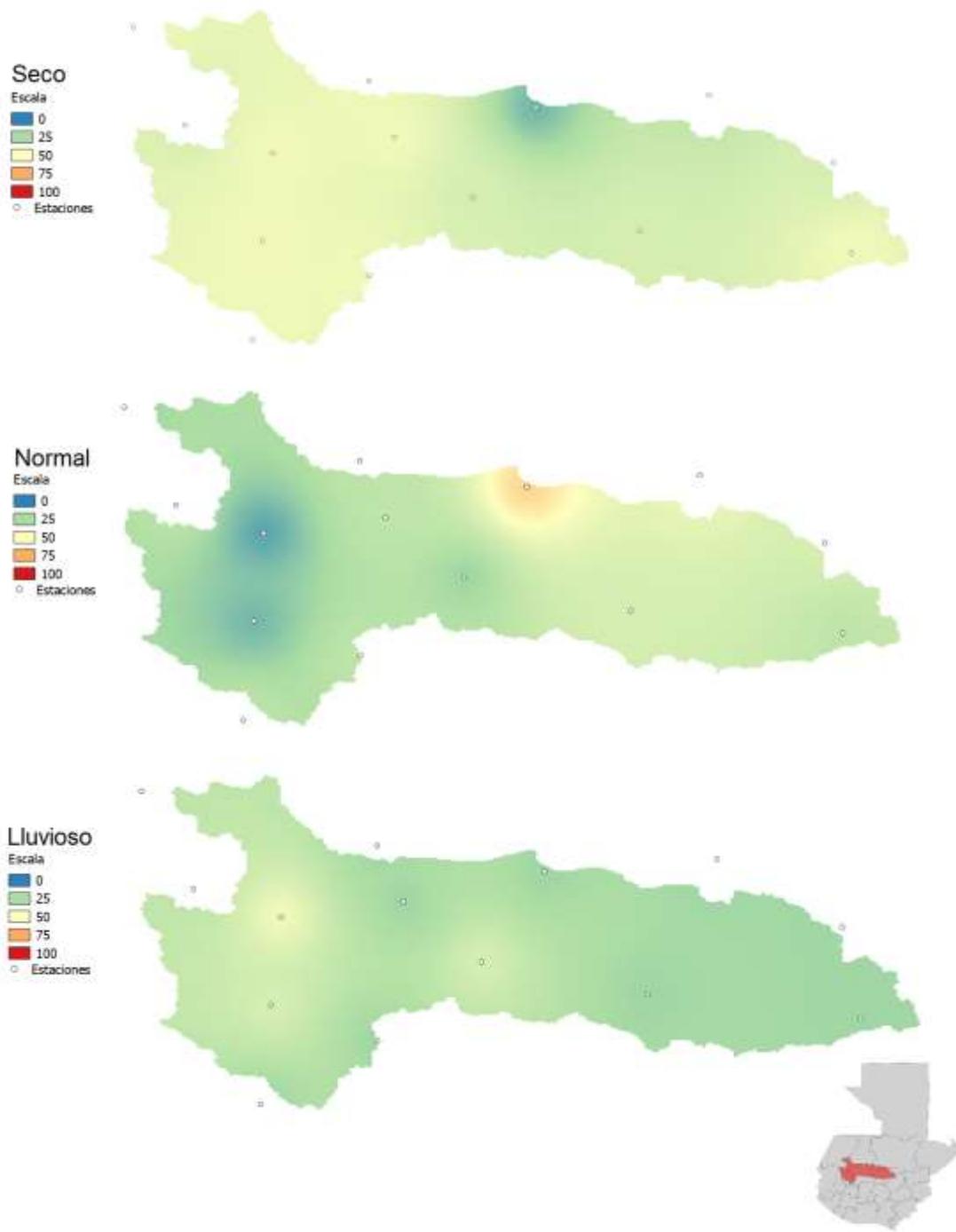
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 50. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante ENSO-neutral, noviembre**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

Figura 51. **Mapa de probabilidad de condiciones climáticas durante La Niña, noviembre**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 2.14.18.

En este estudio, además de caracterizar las condiciones provocadas por el fenómeno El Niño en las condiciones de precipitación de la cuenca, se busca establecer el grado de asociación entre el fenómeno y su incidencia sobre la cuenca. Para ello se utilizó el análisis de correlación; iniciando con la realización de la correlación simple entre el factor oceánico (ONI) y la variable de precipitación de la cuenca.

Como se puede observar en la siguiente tabla, los coeficientes de correlación obtenidos fueron insuficientes para comprobar la relación entre el fenómeno y las condiciones de la cuenca, por lo que se procedió a realizar una correlación múltiple.

Tabla XIII. **Correlación simple, precipitación**

	ONI	
	Absoluta	Anomalía
Purulha	0,1857	-0,0471
San Cristóbal	0,1084	-0,101
Chicamán	0,0870	-0,1154
San Jerónimo	0,1415	-0,0731
Cubulco	0,1955	-0,0633
San Andrés	0,1922	-0,0624
Chuitín	0,1087	-0,1021
Nebaj	0,1457	-0,0702
El Paradillo	0,1717	-0,0681
Todos Santos	0,1835	-0,0606
Huehuetenango	0,1653	-0,0465
Santa Cruz	0,1658	-0,0655
Xequemeyá	0,1675	-0,0826
Totonicapán	0,1760	-0,0694

Fuente: elaboración propia.

La correlación múltiple tomó en cuenta ambos factores: atmosférico (IOS) y oceánico (TSM) del fenómeno relacionándolos con la precipitación sobre la

cuenca durante el período de estudio. La siguiente tabla muestra los coeficientes de correlación múltiple obtenidos según las regiones Niño.

Tabla XIV. Correlación múltiple sin rezago TSM e IOS, precipitación

	Sin Rezago							
	Región Niño 1+2		Región Niño 3		Región Niño 4		Región Niño 3.4	
	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía
Purulha	0,5347	0,0551	0,2333	0,0498	0,2704	0,0557	0,0923	0,0499
San Cristóbal	0,5611	0,084	0,2824	0,093	0,2124	0,1269	0,0854	0,1066
Chicamán	0,4854	0,1015	0,2318	0,106	0,2224	0,1176	0,1063	0,1155
San Jerónimo	0,4964	0,0577	0,2109	0,068	0,2033	0,0939	0,0768	0,0773
Cubulco	0,4252	0,0579	0,1054	0,047	0,2336	0,0835	0,1587	0,0580
San Andrés	0,4311	0,0712	0,1200	0,066	0,2379	0,0914	0,1648	0,0713
Chuitín	0,4679	0,1005	0,1945	0,102	0,1993	0,1367	0,1233	0,1102
Nebaj	0,5814	0,0504	0,2861	0,061	0,2236	0,0917	0,0528	0,0747
El Paradillo	0,3802	0,0672	0,1029	0,064	0,1912	0,1075	0,1462	0,0785
Todos Santos	0,4499	0,0703	0,1176	0,070	0,2702	0,0810	0,1812	0,0730
Huehuetenango	0,4466	0,0574	0,1276	0,052	0,2364	0,0663	0,1431	0,0539
Santa Cruz	0,4987	0,0320	0,1886	0,046	0,2140	0,0908	0,0879	0,0665
Xequemeyá	0,4069	0,0682	0,1030	0,075	0,2261	0,0978	0,1714	0,0816
Totonicapán	0,3996	0,0567	0,0891	0,057	0,2273	0,0879	0,1732	0,0662

Fuente: elaboración propia.

La región Niño 1+2 obtuvo en solamente doce de catorce estaciones resultados satisfactorios. Por esta razón, se procedió a comprobar si la ocurrencia del fenómeno, es decir, el cambio de condiciones en las regiones Niño y en la atmósfera afectan regionalmente a la cuenca con cierto retraso.

Para ello, se utilizaron rezagos de uno, dos y tres meses. En los cuales se mantuvieron fijos los datos provenientes de la cuenca y se realizó un corrimiento, según el retraso, en las variables del fenómeno. Los coeficientes de correlación múltiple resultantes se presentan en las siguientes tablas:

Tabla XV. **Correlación múltiple un mes de rezago TSM e IOS, precipitación**

	1 MES							
	Región Niño 1+2		Región Niño 3		Región Niño 4		Región Niño 3.4	
	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía
Purulha	0,2508	0,0738	0,1289	0,0681	0,2932	0,0681	0,3286	0,0681
San Cristóbal	0,2944	0,092	0,1007	0,100	0,2268	0,1150	0,2540	0,1059
Chicamán	0,2392	0,1122	0,1267	0,113	0,2242	0,1165	0,2473	0,1180
San Jerónimo	0,2223	0,0634	0,1125	0,072	0,2063	0,0790	0,2615	0,0759
Cubulco	0,1277	0,0942	0,2382	0,080	0,2139	0,0839	0,3546	0,0772
San Andrés	0,1353	0,0990	0,2339	0,087	0,2195	0,0928	0,3567	0,0863
Chuitín	0,2080	0,1001	0,1488	0,101	0,1755	0,1307	0,2622	0,1088
Nebaj	0,2940	0,0792	0,0951	0,077	0,2584	0,0844	0,2813	0,0787
El Paradiillo	0,1011	0,0830	0,2124	0,068	0,1582	0,0934	0,3021	0,0745
Todos Santos	0,1489	0,0640	0,2023	0,068	0,1984	0,0719	0,3245	0,0695
Huehuetenango	0,1669	0,0581	0,1593	0,057	0,2352	0,0636	0,2824	0,0586
Santa Cruz	0,2036	0,0516	0,1325	0,059	0,1961	0,0765	0,2788	0,0695
Xequemeyá	0,1236	0,0819	0,2219	0,087	0,1794	0,0923	0,3190	0,0893
Tonicapán	0,1119	0,0757	0,2222	0,072	0,1720	0,0847	0,3170	0,0771

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Correlación múltiple dos meses de rezago TSM e IOS, precipitación**

	2 MES							
	Región Niño 1+2		Región Niño 3		Región Niño 4		Región Niño 3.4	
	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía
Purulha	0,1276	0,0357	0,4152	0,0608	0,1597	0,0495	0,4338	0,0650
San Cristóbal	0,0870	0,062	0,3422	0,091	0,1147	0,1014	0,3628	0,1018
Chicamán	0,1236	0,0757	0,3232	0,088	0,1071	0,0924	0,3199	0,1014
San Jerónimo	0,1360	0,0496	0,3737	0,063	0,1014	0,0698	0,3658	0,0725
Cubulco	0,2647	0,0771	0,4736	0,065	0,0860	0,0772	0,4068	0,0725
San Andrés	0,2516	0,0507	0,4628	0,053	0,0604	0,0798	0,3960	0,0692
Chuitín	0,1840	0,1074	0,3865	0,105	0,1209	0,1190	0,3652	0,1103
Nebaj	0,0913	0,0401	0,3764	0,052	0,1313	0,0774	0,4014	0,0701
El Paradiillo	0,2650	0,0847	0,4547	0,065	0,0692	0,0801	0,3848	0,0633
Todos Santos	0,2409	0,0665	0,4352	0,070	0,0838	0,0697	0,3781	0,0712
Huehuetenango	0,1868	0,0501	0,3843	0,050	0,0798	0,0530	0,3481	0,0526
Santa Cruz	0,1807	0,0607	0,4191	0,064	0,1089	0,0743	0,3987	0,0717
Xequemeyá	0,2693	0,0810	0,4426	0,088	0,3656	0,0914	0,3656	0,0919
Tonicapán	0,2698	0,0698	0,4376	0,074	0,0668	0,0771	0,3575	0,0739

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Correlación múltiple tres meses de rezago TSM e IOS, precipitación**

	3 MES							
	Región Niño 1+2		Región Niño 3		Región Niño 4		Región Niño 3.4	
	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía	Absoluta	Anomalía
Purulha	0,4939	0,0748	0,6413	0,0758	0,0786	0,0742	0,4705	0,0751
San Cristóbal	0,4391	0,086	0,5746	0,091	0,0873	0,0986	0,4167	0,0970
Chicamán	0,4241	0,1116	0,5153	0,104	0,1035	0,1043	0,3697	0,1061
San Jerónimo	0,4487	0,0581	0,5527	0,066	0,0600	0,0616	0,3824	0,0686
Cubulco	0,5667	0,0914	0,5925	0,078	0,1097	0,0814	0,3604	0,0846
San Andrés	0,5641	0,0836	0,6129	0,072	0,1065	0,0797	0,3866	0,0745
Chuitín	0,4635	0,1054	0,5362	0,101	0,1133	0,1135	0,3609	0,1064
Nebaj	0,4556	0,0592	0,6088	0,057	0,0539	0,0670	0,4445	0,0662
El Paradillo	0,5433	0,1105	0,5820	0,089	0,1135	0,0855	0,3692	0,0791
Todos Santos	0,5301	0,0630	0,5406	0,071	0,1076	0,0684	0,3194	0,0745
Huehuetenango	0,4735	0,0675	0,5210	0,065	0,0679	0,0648	0,3423	0,0656
Santa Cruz	0,5166	0,0901	0,6091	0,079	0,0827	0,0809	0,4181	0,0799
Xequemeyá	0,5510	0,1128	0,5626	0,110	0,1406	0,1128	0,3403	0,1128
Totonicapán	0,5556	0,1136	0,5631	0,097	0,1167	0,0961	0,3480	0,0961

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se observan en negrilla los coeficientes de correlación resultantes mayores a 0,5 entre el fenómeno y la precipitación de la cuenca, como se puede observar estos se dan con un rezago de tres meses con datos de la región Niño 3.

Luego de realizar el análisis de correlación y obtener resultados satisfactorios, se realizó un análisis de regresión con el que se obtuvieron los modelos para los coeficientes de correlación múltiple mayores a 0,5; presentados en la siguiente tabla, según sus estaciones:

Tabla XVIII. **Modelos matemáticos para precipitación, con mayor correlación múltiple: tres meses de rezago TSM absoluta e IOS en región Niño 3**

Estaciones	Modelo Matemático: Región Niño 3
Purulha	$P_{total} = -2117,3926 + 89,0023 * TSM + 66,2220 * IOS$
San Cristóbal	$P_{total} = -1370,4355 + 58,3842 * TSM + 45,6642 * IOS$
Chicamán	$P_{total} = -1024,3210 + 43,3756TSM + 36,6682IOS$
San Jerónimo	$P_{total} = -1054,0627 + 43,7071TSM + 31,8039IOS$
Cubulco	$P_{total} = -1196,7861 + 49,6041TSM + 37,5598IOS$
San Andrés	$P_{total} = -1285,3153 + 53,0041TSM + 39,3981IOS$
Chuitín	$P_{total} = -961,1998 + 39,8008TSM + 32,8029IOS$
Nebaj	$P_{total} = -1866,8782 + 78,2512TSM + 55,5209IOS$
El Parádillo	$P_{total} = -1058,9605 + 43,7524TSM + 33,4392IOS$
Todos los Santos	$P_{total} = -1042,5433 + 44,1304TSM + 32,6847IOS$
Huehuetenango	$P_{total} = -979,8924 + 41,0477TSM + 30,7933IOS$
Santa Cruz	$P_{total} = -1211,5354 + 50,0348TSM + 37,9707IOS$
Xequemeyá	$P_{total} = -1187,1474 + 49,4204TSM + 41,4497IOS$
Totonicapán	$P_{total} = -934,3645 + 38,8618TSM + 31,4524IOS$

Fuente: elaboración propia.

Luego con el fin de obtener resultados que definieran la incidencia del fenómeno El Niño sobre el área de la cuenca del río Chixoy estudiada, se obtuvo una serie de datos de precipitación media que abarca el mismo período de 1979 a 2016 por medio del método de Polígonos de Thiessen, obteniéndose la siguiente tabla que describe la probabilidad de ocurrencia de las condiciones climáticas según los eventos del ciclo ENOS sobre la cuenca.

Tabla XIX. Probabilidad de ocurrencia El Niño para precipitación media, cuenca del río Chixoy

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
ABRIL	SECO	43%	36%	17%	87%	13%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	29%	28%	50%			
	LLUVIOSO	29%	36%	33%			
MAYO	SECO	56%	23%	43%	7%	93%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	44%	32%	14%			
	LLUVIOSO	0%	45%	43%			
JUNIO	SECO	50%	29%	33%	75%	25%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	25%	38%	17%			
	LLUVIOSO	25%	33%	50%			
JULIO	SECO	63%	32%	13%	26%	74%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	25%	27%	50%			
	LLUVIOSO	13%	41%	38%			
AGOSTO	SECO	88%	25%	10%	0%	100%	DEPENDIENTES
	NORMAL	13%	45%	20%			
	LLUVIOSO	0%	30%	70%			
SEPTIEMBRE	SECO	64%	24%	20%	21%	79%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	18%	41%	30%			
	LLUVIOSO	18%	35%	50%			
OCTUBRE	SECO	42%	33%	27%	7%	93%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	50%	33%	9%			
	LLUVIOSO	8%	33%	64%			
NOVIEMBRE	SECO	31%	33%	38%	92%	8%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	31%	25%	38%			
	LLUVIOSO	38%	42%	23%			

Fuente: elaboración propia.

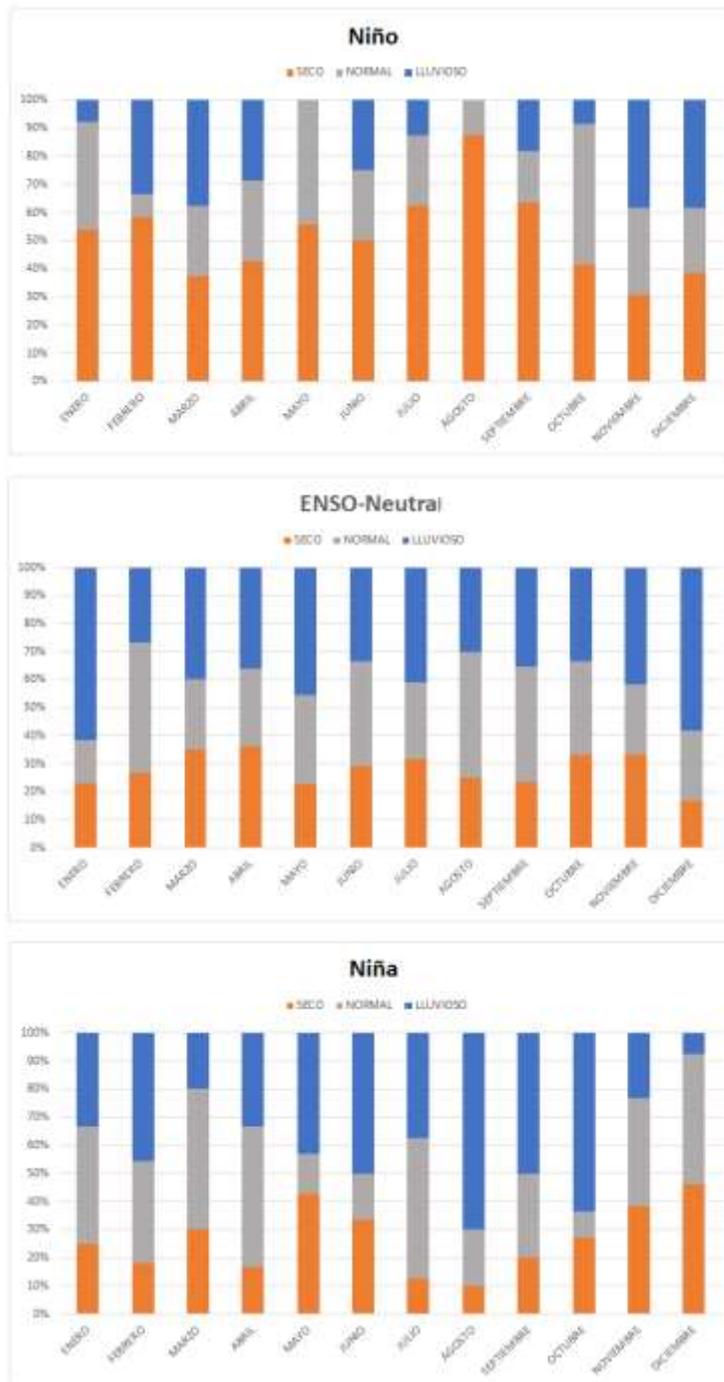
De la tabla de contingencia realizada para precipitación media del área de la cuenca del río Chixoy estudiada se obtuvo que: durante El Niño predominó la condición seca para abril a septiembre, teniendo una condición normal durante octubre y una condición lluviosa durante noviembre; durante La Niña predominó la condición lluviosa de junio y de agosto a octubre; y durante ENSO-neutral predominó la condición normal en junio y septiembre.

La prueba exacta de Fisher demostró, con 5 % de significancia, la relación entre las condiciones climáticas y la ocurrencia de eventos del ciclo ENOS, únicamente durante agosto. Donde el 100 % de las veces existe una probabilidad

de: 88 % de condiciones secas durante El Niño, 45 % de condición normal durante ENSO-neutral y 70 % de condición lluviosa durante La Niña.

Para que obtener una mejor percepción de las probabilidades de ocurrencia de las condiciones climáticas durante cada evento del ciclo ENOS se graficaron en columnas apiladas las probabilidades para todos los meses del año.

Figura 52. Gráfica de la probabilidad de ocurrencia de condiciones climáticas para precipitación media, según cada evento del ciclo ENOS



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2016.

Luego se realizó el análisis de correlación, demostrando estos resultados en las siguientes tablas. Se inició con la correlación simple el cual demostró que solo el factor oceánico es insuficiente para demostrar una correlación.

Tabla XX. **Correlación simple, precipitación cuenca del río Chixoy**

	ONI
ABSOLUTA	0,167
ANOM	-0,085

Fuente: elaboración propia.

Por lo que se realizó una correlación múltiple resultando la mayor correlación en la región Niño 3 con rezago de tres meses.

Tabla XXI. **Correlación múltiple, precipitación cuenca del río Chixoy**

		TSM e IOS			
		SIN REZAGO	1 MES	2 MESES	3 MESES
NIÑO 1+2	ABSOLUTA	0,52	0,21	0,20	0,55
	ANOM	0,07	0,09	0,07	0,10
NIÑO 3	ABSOLUTA	0,19	0,18	0,44	0,63
	ANOM	0,08	0,09	0,07	0,09
NIÑO 4	ABSOLUTA	0,25	0,23	0,10	0,10
	ANOM	0,11	0,10	0,09	0,09
NIÑO 3.4	ABSOLUTA	0,13	0,33	0,41	0,42
	ANOM	0,09	0,09	0,09	0,09

Fuente: elaboración propia.

Luego se realizó el análisis de regresión, obteniendo el siguiente modelo matemático para la correlación en la región Niño 3 con rezago de tres meses:

$$P_{total} = -1201,34 + 50,1804TSM + 38,9566IOS$$

5.2. Caudal

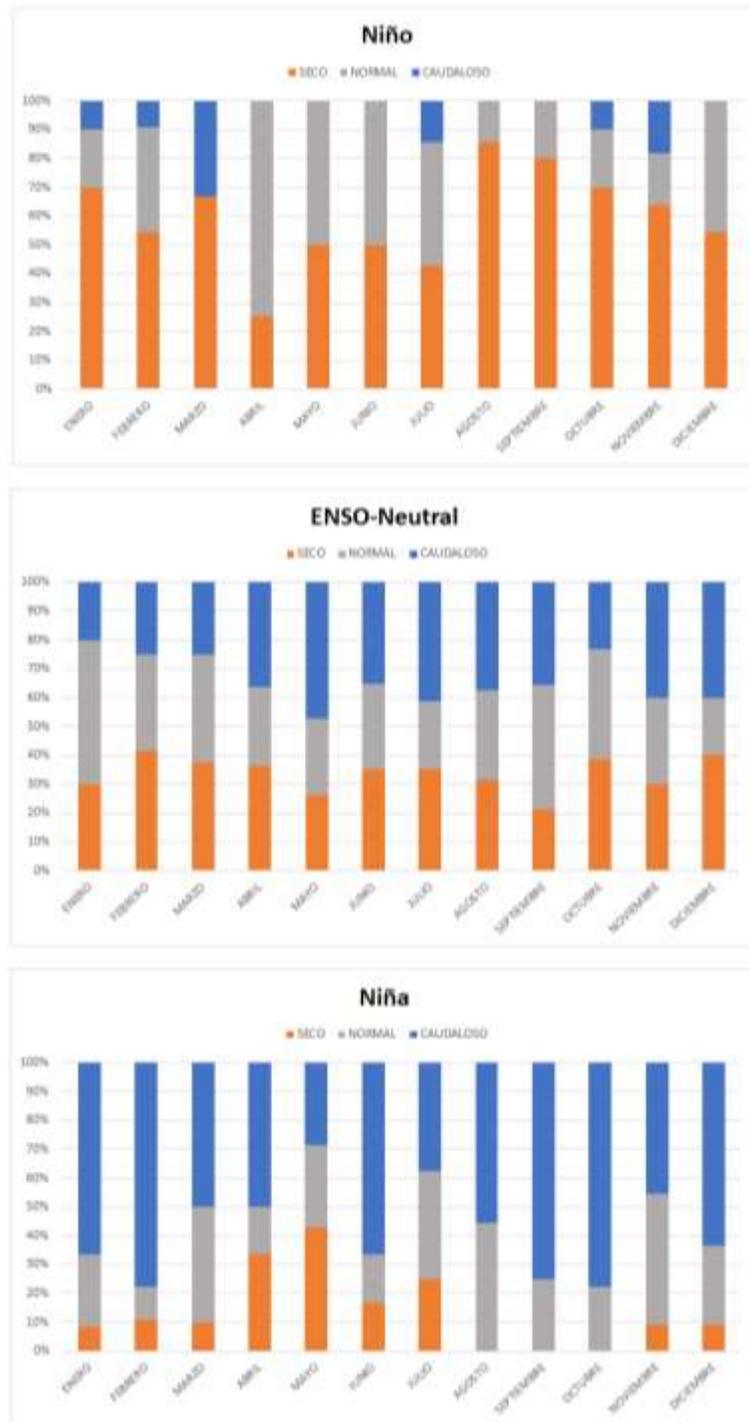
La tabla de contingencia comprobó una condición seca durante El Niño, exceptuando durante abril donde se obtuvo una condición normal.

Tabla XXII. Probabilidad de ocurrencia y prueba de Fisher para caudal, cuenca del río Chixoy

		TABLA DE CONTINGENCIA			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NORMAL	NIÑA	SIGNIFICANCIA	CONFIABILIDAD	CONCLUSIÓN
ENERO	SECO	70%	30%	8%	1%	99%	DEPENDIENTES
	NORMAL	20%	50%	25%			
	CAUDALOSO	10%	20%	67%			
FEBRERO	SECO	55%	42%	11%	3%	97%	DEPENDIENTES
	NORMAL	36%	33%	11%			
	CAUDALOSO	9%	25%	78%			
MARZO	SECO	67%	38%	10%	13%	87%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	0%	38%	40%			
	CAUDALOSO	33%	25%	50%			
ABRIL	SECO	25%	36%	33%	44%	56%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	75%	27%	17%			
	CAUDALOSO	0%	36%	50%			
MAYO	SECO	50%	26%	43%	30%	70%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	50%	26%	29%			
	CAUDALOSO	0%	47%	29%			
JUNIO	SECO	50%	35%	17%	21%	79%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	50%	30%	17%			
	CAUDALOSO	0%	35%	67%			
JULIO	SECO	43%	35%	25%	71%	29%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	43%	24%	38%			
	CAUDALOSO	14%	41%	38%			
AGOSTO	SECO	86%	31%	0%	1%	99%	DEPENDIENTES
	NORMAL	14%	31%	44%			
	CAUDALOSO	0%	38%	56%			
SEPTIEMBRE	SECO	80%	21%	0%	0%	100%	DEPENDIENTES
	NORMAL	20%	43%	25%			
	CAUDALOSO	0%	36%	75%			
OCTUBRE	SECO	70%	38%	0%	1%	99%	DEPENDIENTES
	NORMAL	20%	38%	22%			
	CAUDALOSO	10%	23%	78%			
NOVIEMBRE	SECO	64%	30%	9%	13%	87%	INDEPENDIENTES
	NORMAL	18%	30%	45%			
	CAUDALOSO	18%	40%	45%			
DICIEMBRE	SECO	55%	40%	9%	1%	99%	DEPENDIENTES
	NORMAL	45%	20%	27%			
	CAUDALOSO	0%	40%	64%			

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Gráfica de la probabilidad de ocurrencia de condiciones climáticas para caudal, según cada evento del ciclo ENOS



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2016.

Luego se realizó el análisis de correlación, se inició con la correlación simple el cual demostró que solo el factor oceánico es insuficiente para demostrar una correlación.

Tabla XXIII. **Correlación simple, caudal**

ONI	
ABSOLUTA	ANOM
-0,109	-0,189

Fuente: elaboración propia.

Por lo que se realizó una correlación múltiple resultando la mayor correlación en la región Niño 1+2 sin rezago.

Tabla XXIV. **Correlación múltiple TSM e IOS, caudal**

		Niño 1+2	Niño 3	Niño 4	Niño 3.4
Sin Rezago	Absoluta	0,6006	0,4514	0,1866	0,2489
	Anomalía	0,1768	0,1881	0,2340	0,2033
1 Mes	Absoluta	0,4686	0,2628	0,1697	0,1458
	Anomalía	0,1461	0,1605	0,2131	0,1802
2 Meses	Absoluta	0,2278	0,1269	0,1319	0,1993
	Anomalía	0,1184	0,1321	0,1941	0,1563
3 Meses	Absoluta	0,1658	0,3376	0,1231	0,3172
	Anomalía	0,1225	0,1301	0,1797	0,1497

Fuente: elaboración propia.

Por último, se realizó el análisis de regresión, obteniendo el siguiente modelo matemático:

$$C_{total} = 413,53 - 15,3264 * TSM + 4,8028 * IOS$$

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los efectos El Niño sobre la precipitación media de la cuenca se presentan con mayor probabilidad de condición seca desde abril hasta septiembre. Durante octubre se tiene una mayor probabilidad que se tenga una condición normal sobre la cuenca y en noviembre la condición lluviosa tiene mayor probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, el único mes con significancia estadística es agosto, en donde se demostró la dependencia entre la condición climática de la cuenca y la ocurrencia del fenómeno.

Los efectos de La Niña sobre la precipitación media de la cuenca son los siguientes: durante abril y julio se tiene una mayor probabilidad de una condición normal, en mayo se tiene mayor probabilidad de condición seca, durante junio y de agosto a octubre se tiene una mayor probabilidad de condición lluviosa, y durante noviembre la probabilidad varía de condición seca a normal. Sin embargo, agosto es el único mes con significancia estadística, donde se demostró la dependencia entre la condición lluviosa de la cuenca durante la ocurrencia del fenómeno.

Respecto del análisis realizado para las estaciones estudiadas se obtuvieron los siguientes resultados durante la ocurrencia del fenómeno El Niño:

Tabla XXV. Resumen de resultados: El Niño condición seca

	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.
PURULHA	✓	✓			✓		✓	
SAN CRISTÓBAL		✓	✓		✓	✓		
CHICAMÁN		✓	✓	✓	✓	✓		✓
SAN JERÓNIMO		✓			✓	✓		
CUBULCO	✓	✓			✓	✓		
SAN ANDRÉS		✓		✓	✓	✓		✓
CHUITÍN		✓	✓	✓	✓		✓	
NEBAJ	✓	✓	✓		✓	✓	✓	
EL PARADILLO	✓			✓	✓	✓	✓	
TODOS LOS SANTOS	✓	✓		✓	✓		✓	
HUEHUETENANGO		✓	✓		✓	✓		
SANTA CRUZ DEL QUICHÉ					✓	✓		
XEQUEMEYÁ		✓			✓	✓		
TOTONICAPÁN		✓	✓	✓	✓			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. Resumen de resultados: El Niño condición normal

	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.
PURULHA								✓
SAN CRISTÓBAL				✓				
CHICAMÁN	✓							
SAN JERÓNIMO								
CUBULCO							✓	✓
SAN ANDRÉS	✓							
CHUITÍN						✓		
NEBAJ								
EL PARADILLO								✓
TODOS LOS SANTOS						✓		
HUEHUETENANGO				✓			✓	
SANTA CRUZ DEL QUICHÉ	✓	✓		✓				
XEQUEMEYÁ	✓		✓				✓	
TOTONICAPÁN	✓						✓	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Resumen de resultados: El Niño condición lluviosa**

	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.
PURULHA								
SAN CRISTÓBAL								
CHICAMÁN								
SAN JERÓNIMO								✓
CUBULCO			✓					
SAN ANDRÉS								
CHUITÍN								✓
NEBAJ								
EL PARADILLO								
TODOS LOS SANTOS								✓
HUEHUETENANGO								
SANTA CRUZ DEL QUICHÉ								✓
XEQUEMEYÁ								
TOTONICAPÁN								✓

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, las estaciones con significancia estadística que demostraron dependencia entre la ocurrencia de eventos El Niño y las condiciones climáticas de la cuenca son: para mayo Nebaj y Huehuetenango con condición seca. Para junio, Cubulco con condición lluviosa. Para agosto, Purulhá, San Cristóbal, Chicamán, San Jerónimo, Cubulco, San Andrés, Chuitín, El Paradiillo, Todos los Santos, Huehuetenango, Santa Cruz del Quiché y Totonicapán con condición seca. Para septiembre, Chicamán y San Andrés con condición seca; y para octubre, San Cristóbal con condición variable de seca a normal.

Respecto del análisis realizado para las estaciones estudiadas se obtuvieron los siguientes resultados durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña:

Tabla XXVIII. Resumen de resultados: La Niña condición seca

	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.
PURULHA								
SAN CRISTÓBAL								
CHICAMÁN		✓						
SAN JERÓNIMO	✓	✓						✓
CUBULCO	✓							
SAN ANDRÉS	✓							
CHUITÍN								✓
NEBAJ		✓						✓
EL PARADILLO								
TODOS LOS SANTOS								✓
HUEHUETENANGO							✓	✓
SANTA CRUZ DEL QUICHÉ		✓						✓
XEQUEMEYÁ	✓							✓
TOTONICAPÁN	✓							✓

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Resumen de resultados: La Niña condición normal

	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.
PURULHA		✓	✓					
SAN CRISTÓBAL			✓					✓
CHICAMÁN								✓
SAN JERÓNIMO								
CUBULCO			✓					
SAN ANDRÉS					✓			
CHUITÍN	✓							
NEBAJ			✓	✓				
EL PARADILLO	✓							
TODOS LOS SANTOS				✓				
HUEHUETENANGO		✓						
SANTA CRUZ DEL QUICHÉ								
XEQUEMEYÁ				✓				
TOTONICAPÁN								

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Resumen de resultados: La Niña condición lluviosa**

	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.
PURULHA	✓				✓	✓		
SAN CRISTÓBAL	✓			✓	✓	✓	✓	
CHICAMÁN	✓				✓	✓	✓	
SAN JERÓNIMO			✓	✓	✓	✓	✓	
CUBULCO		✓			✓		✓	
SAN ANDRÉS		✓	✓			✓	✓	
CHUITÍN		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
NEBAJ					✓	✓	✓	
EL PARADILLO			✓	✓	✓	✓		
TODOS LOS SANTOS			✓		✓	✓		
HUEHUETENANGO					✓	✓		
SANTA CRUZ DEL QUICHÉ	✓		✓				✓	
XEQUEMEYÁ			✓		✓	✓		
TOTONICAPÁN		✓			✓	✓		

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, las estaciones con significancia estadística que demostraron dependencia entre la ocurrencia de eventos de La Niña y las condiciones climáticas de la cuenca son: para mayo Nebaj con condición seca y Huehuetenango con condición normal; para junio Cubulco con condición normal; para agosto Purulhá, San Cristóbal, Chicamán, San Jerónimo, Cubulco, Chuitín, Nebaj, El Paradillo, Todos los Santos, Huehuetenango, Xequemeyá, Totonicapán con condición lluviosa y San Andrés con condición normal; para septiembre Chicamán y San Andrés con condición lluviosa; para octubre San Cristóbal con condición lluviosa; y para noviembre Chicamán con condición normal.

De las correlaciones realizadas a cada estación utilizando las variables de temperatura superficial del mar (TSM) y el índice de oscilación sur (IOS), se obtuvieron: correlaciones mayores que 0,5 en la región Niño 1+2 en la mayoría de estaciones. Con uno y dos meses de rezago las correlaciones aceptables se

presentaron en la región Niño 3.4, sin embargo, se obtuvo la mayor correlación en la región Niño 3 con tres meses de rezago.

Del mismo modo, para los datos de precipitación media sin rezago se obtuvo una buena correlación en la región Niño 1+2, teniendo la correlación más fuerte con tres meses de rezago en la región Niño 3.

Con los mapas realizados se pueden observar meses durante los cuales las condiciones climáticas son uniformes sobre toda la cuenca. Las condiciones secas uniformes se observan: durante la ocurrencia El Niño en junio y octubre, y durante La Niña en noviembre. Por otro lado, las condiciones lluviosas uniformes se observan: durante La Niña en mayo y octubre, y durante ENSO-neutral en julio y octubre.

Sin embargo, también puede observarse en los mapas la variabilidad de condiciones en las estaciones con respecto a las condiciones esperadas durante los eventos del ciclo ENOS y en la figura 53 se observa la variabilidad de condiciones respecto de los meses del año durante cada evento del ciclo ENOS.

En el análisis de los datos de caudal se tiene durante la ocurrencia de un evento El Niño: una condición seca durante enero a marzo y de agosto a diciembre; una condición normal durante abril; y una condición variable de normal a seco de mayo a julio. La prueba exacta de Fisher demostró, con 5 % de significancia, la dependencia entre las condiciones presentadas y la ocurrencia del fenómeno durante enero, febrero, agosto, septiembre, octubre y diciembre.

Para La Niña, los resultados del análisis de datos de caudal son: condición lluviosa de enero a abril, junio, de agosto a octubre y diciembre; y durante mayo se obtuvo una condición seca. La prueba exacta de Fisher demostró, con 5 % de

significancia la dependencia entre las condiciones presentadas y su ocurrencia durante enero, febrero, agosto, septiembre, octubre y diciembre.

La figura 54 representa gráficamente la variabilidad de las condiciones durante los eventos del ciclo ENOS, durante El Niño se observa una condición seca predominante durante la mayoría del año, eliminando la probabilidad de una condición caudalosa desde abril a junio y agosto, septiembre y diciembre.

Las correlaciones realizadas para los datos de caudal, utilizando las variables de temperatura superficial del mar (TSM) y el índice de oscilación sur (IOS), se obtuvo la mayor correlación sin meses de rezago en la región Niño 1+2.

CONCLUSIONES

1. Los efectos El Niño sobre la precipitación de la cuenca del río Chixoy se obtuvieron por medio de las tablas de contingencia y mapas realizados para cada mes, se involucraron catorce estaciones meteorológicas. En agosto se obtuvo la mayor probabilidad de una condición seca durante El Niño, la mayoría de las estaciones con confiabilidad mayor al 95 %. Durante junio, Cubulco obtuvo mayor probabilidad de presentar, con una confiabilidad del 99 %, una condición lluviosa durante la ocurrencia del fenómeno. Para el análisis de precipitación media se obtuvo una probabilidad de mayor ocurrencia de condición seca desde abril a agosto. Durante octubre se obtuvo una condición normal más probable y durante noviembre una condición lluviosa más probable. Comprobándose la importancia de la realización de estudios para determinar los efectos locales que tienen los eventos del ciclo ENOS.
2. Los efectos de La Niña sobre la precipitación de la cuenca del río Chixoy se obtuvieron con una mayor probabilidad de condiciones lluviosas en la mayoría de las estaciones en agosto, con confiabilidad mayor al 90 %. Sin embargo, en San Andrés predomina una condición normal con confiabilidad del 100 %. Durante los meses restantes con una confiabilidad mayor del 90 % se obtuvieron los siguientes resultados: durante mayo en Nebaj predomina la condición seca y en Huehuetenango condición normal; durante junio en Cubulco la condición normal; y durante noviembre en Chicamán predomina una condición normal durante la ocurrencia de eventos La Niña. Para precipitación media se tiene una mayor probabilidad

de una condición normal para abril y julio, y una condición seca durante mayo.

3. Para el análisis de datos de caudal se obtuvo una mayor probabilidad de condiciones secas durante la ocurrencia El Niño, con una confiabilidad mayor al 95 %, en enero, febrero, agosto, septiembre, octubre y diciembre.
4. Durante la ocurrencia de La Niña se obtuvo mayor probabilidad de tener condiciones caudalosas en enero, febrero, agosto, septiembre, octubre y diciembre, con una confiabilidad mayor al 95 %.
5. Durante la ocurrencia de ENSO-neutral se espera que la probabilidad de ocurrencia de una condición normal sea mayor, esto sucede en agosto. Sin embargo, para el análisis de estaciones la condición lluviosa tiene mayor probabilidad de ocurrencia de abril, mayo y octubre; en los demás meses la probabilidad de ocurrencia varía entre seca y lluviosa. Para los datos de precipitación media, mayo, julio y noviembre, la condición es lluviosa. Para caudal se obtuvo mayor probabilidad de condición seca durante febrero y de condición caudaloso durante mayo, julio, agosto y noviembre.
6. Al correlacionar el fenómeno El Niño con las condiciones climatológicas de la región que abarca la cuenca del río Chixoy se comprobó la necesidad de involucrar el factor oceánico y el factor atmosférico para el estudio de sus efectos. Así mismo, se aplicó el parámetro de retraso en el tiempo de influencia que este fenómeno tiene sobre la cuenca. Se obtuvo la mayor correlación en la región Niño 3 con tres meses de rezago, para el estudio de las estaciones y para los datos de precipitación promedio

representativos de toda la cuenca. Para los datos de caudal se obtuvo la mayor correlación sin rezago en la región Niño 1+2.

RECOMENDACIONES

1. A partir de la realización de este estudio, se comprobó la importancia de que las estaciones hidrometeorológicas y climáticas se encuentren en estado óptimo con el fin de obtener consistentemente registros de datos, ya que con la obtención de registros completos resultan investigaciones consecuentes con las condiciones reales. También se da una mejor gestión de los recursos hídricos disponibles.
2. Replicar este estudio en otras cuencas de Guatemala, para determinar el impacto local que tiene El Niño y La Niña sobre los recursos hídricos de cada cuenca y así definir con más precisión el manejo del recurso.
3. La Facultad de Ingeniería y las partes involucradas en la gestión del recurso hídrico de la hidroeléctrica del río Chixoy, pueden trabajar en la realización de un estudio que correlacione los resultados obtenidos en este estudio con los registros de generación de energía, con el fin realizar una planificación que tome en consideración todas las variables involucradas.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Análisis de tablas de contingencia.* [en línea]. <<http://www.ub.edu/stat/GrupsInnovacio/Statmedia/demo/Temas/Capitul12/B0C12m1t5.htm>>. [Consulta: 2 de agosto de 2017].
2. Blasina y Asociados. *Sistema de monitoreo ENSO está en estatus de alerta de El Niño.* [en línea]. <<http://www.blasinayasociados.com/espanol/sistema-de-monitoreo-enso-esta-en-estatus-de-alerta-de-el-nino-9?nid=1083/>>. [Consulta: 6 de junio de 2017].
3. CÁRDENAS, Julián. *Tablas de contingencia: Cómo analizarlas fácilmente.* [en línea]. <<http://networkianos.com/tablas-de-contingencia/>>. [Consulta: 2 de agosto de 2017].
4. CEPREDENAC. *El Fenómeno “El Niño” 1997-98 en Guatemala.* [en línea]. <<http://www.bvsde.paho.org/texcom/cd046995/LHerrera.pdf>>. [Consulta: 10 de marzo de 2017].
5. DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias.* 7a ed. México: CENGAGE Learning, 2008. 245 p.
6. DOBIAS, Jonas. *El Fenómeno “El Niño” y su impacto en la generación hidroeléctrica de Chixoy.* [en línea].

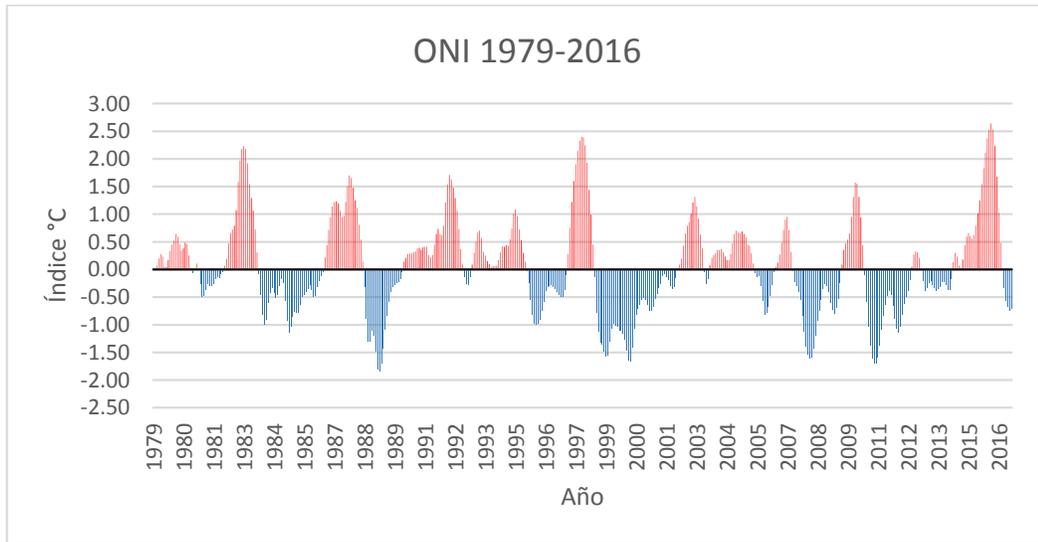
<<http://www.cnee.gob.gt/wp/?p=2027>>. [Consulta: 10 de marzo de 2017].

7. FIGUERÓA GARCÍA, Jorge David. *Análisis de la variabilidad hidrometeorológica en la parte alta de la cuenca del Río Chixoy*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016, 194p.
8. Global Weather Oscillations. *La Niña – Neutral Conditions – El Niño*. [en línea]. <<http://www.globalweatheroscillations.com/el-nio-la-nina>> [Consulta: 6 de junio de 2017].
9. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. *Metodología de la investigación*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 2014. 634 p.
10. INSIVUMEH. *División hidrológica de Guatemala*. [en línea]. <[http://www.insivumeh.gob.gt/riosdeguatemala.html#DIVISION HIDROLOGICA DE GUATEMALA](http://www.insivumeh.gob.gt/riosdeguatemala.html#DIVISION_HIDROLOGICA_DE_GUATEMALA)>. [Consulta: 7 de junio de 2017].
11. MONTERO, José. *Estadística descriptiva*. [en línea]. <https://books.google.es/books?hl=en&lr=&id=D6sj2d0xTgUC&oi=fnd&pg=PR4&dq=correlaci%C3%B3n+m%C3%BAAltiplo&ots=4nJdnJdSlq&sig=j7F_XFdPklemVeCQCHD0Hrs6E8#v=onepage&q=correlac%C3%B3n%20m%C3%BAAltiplo&f=true>. [Consulta: 2 de agosto de 2017].
12. NOTIACTUAL. *El clima puede empeorar en el 2016, lea por qué*. [en línea]. <<http://www.notiactual.com/el-clima-puede-empeorar-en-el-2016-lee-por-que/>>. [Consulta: 06 de junio de 2017].

13. OTERO, José Vicéns; MORAL, Eva Medina. *Análisis de datos cualitativos*. [en línea]. <https://www.uam.es/personal_pdi/economicas/eva/pdf/tab_continuacion.pdf>. [Consulta: 2 de agosto de 2017].
14. Pacific Marine Environmental Laboratory. *What is El Niño?*. [en línea]. <<https://www.pmel.noaa.gov/el-nino/what-is-el-nino/>>. [Consulta: 6 de junio de 2017].
15. REYES DONIS, Gerardo Eleazar. *Determinación de la variabilidad de los recursos hídricos, relacionados al cambio climático en la cuenca del río Chixoy*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016, 110 p.
16. Universidad de Piura. *ENOS: El Niño – Oscilación SUR*. [en línea]. <<http://udep.edu.pe/el-nino/enos-el-nino-oscilacion-sur/>>. [Consulta: 15 de mayo de 2017].
17. WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9a ed. México: Pearson Educación, 2012. 816 p.

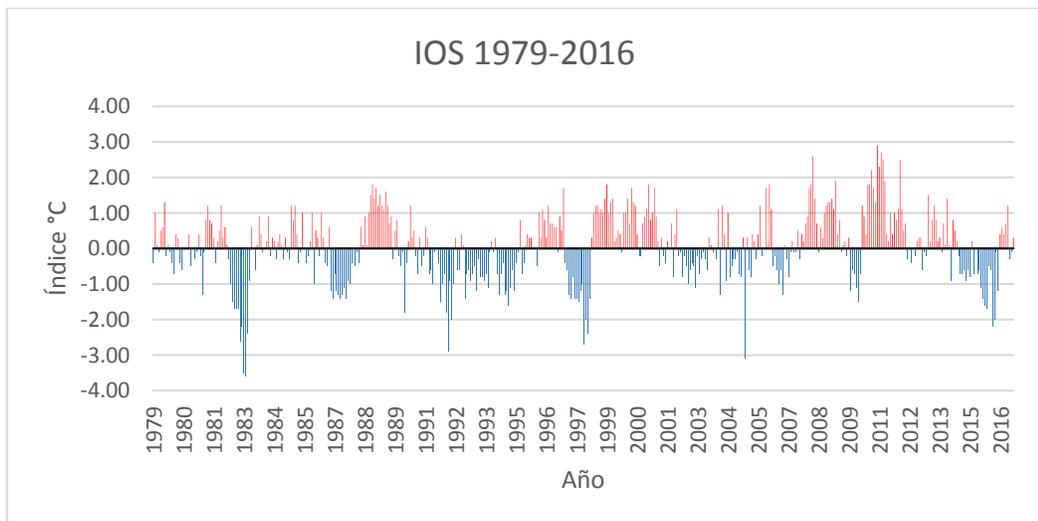
APÉNDICES

Apéndice 1. **Comportamiento anomalía ONI, período 1979-2016**



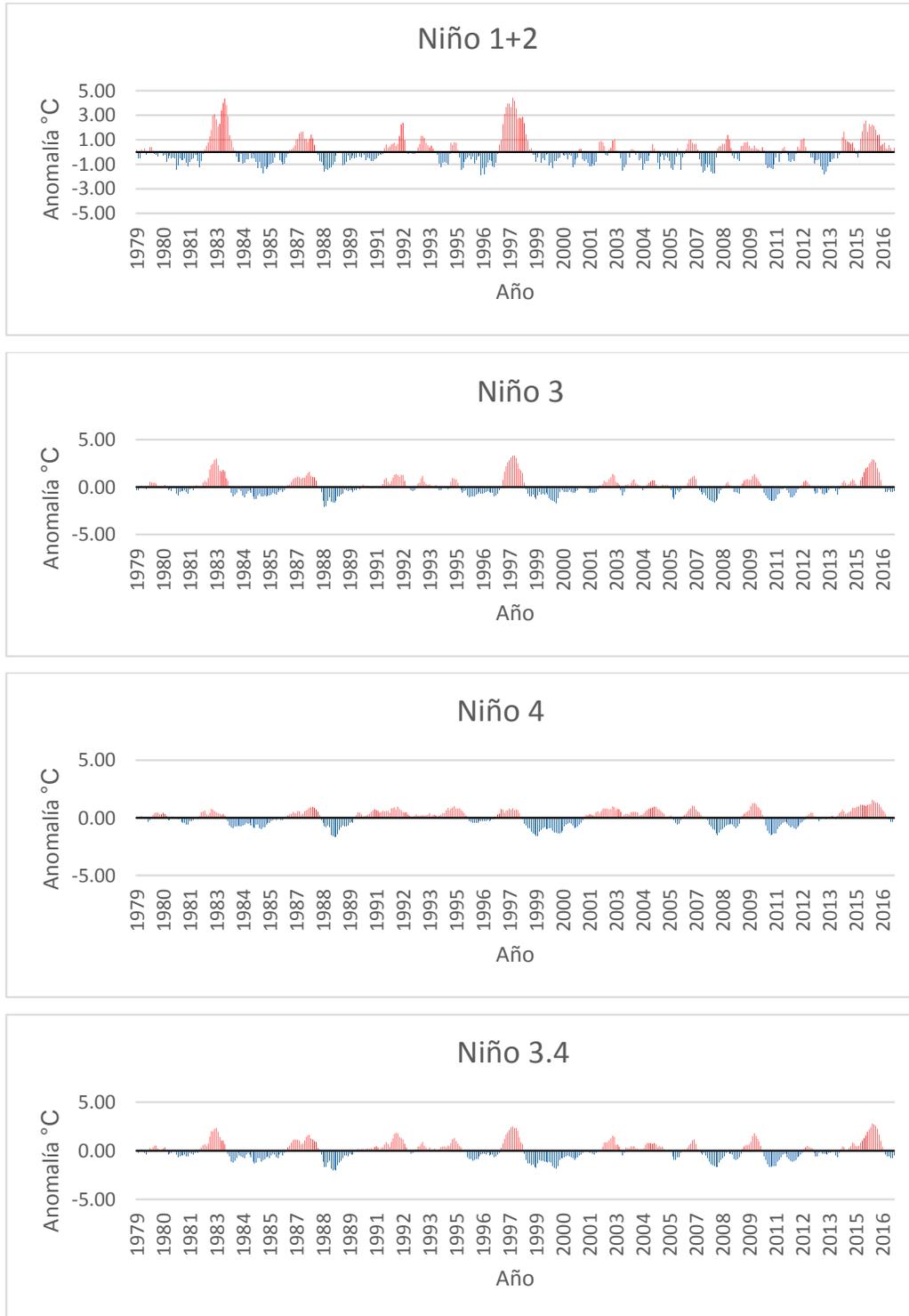
Fuente: elaboración propia, según datos de NOAA.

Apéndice 2. **Comportamiento IOS, período 1979 – 2016**



Fuente: elaboración propia, según datos de NOAA.

Apéndice 3. Comportamiento anomalía TSM



Fuente: elaboración propia, según datos de NOAA.