



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

**DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VARIABILIDAD EN LOS
RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA, ASOCIADOS
AL CAMBIO CLIMÁTICO**

José Luis Paz Ardón

Asesorado por la Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca

Guatemala, febrero de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VARIABILIDAD EN LOS
RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA, ASOCIADOS
AL CAMBIO CLIMÁTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ LUIS PAZ ARDÓN

ASESORADO POR LA INGA. KARLA GIOVANNA PÉREZ LOARCA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordoñez Hernández
EXAMINADOR	Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VARIABILIDAD EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA, ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

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

José Luis Paz Ardón

Guatemala, 29 de julio de 2019.

Ingeniero

Pedro Antonio Aguilar Polanco

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Aguilar:

Por medio de la presente me permito informar que en mi calidad de asesora, he procedido a la revisión final del trabajo de graduación: **DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VARIABILIDAD EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA, ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO**, desarrollado por el estudiante universitario José Luis Paz Ardón, con carné No. 2011-15141, determinando que el mismo cumple con todos los requisitos establecidos en el reglamento de graduación, por lo que de la manera más atenta, recomiendo continuar con los trámites respectivos para su aprobación.

Atentamente,



K. Giovanna J. Pérez Loarca
Msc. ING. CIVIL
COL. No. 7718

Msc. Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca

Col. No. 7718

Asesora de trabajo de graduación



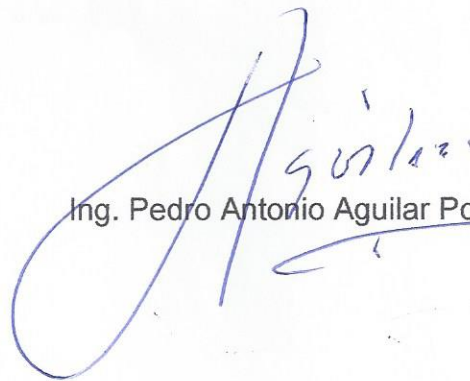
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil y Jefe del Departamento de Hidráulica, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca, al trabajo de graduación del estudiante José Luis Paz Ardón **DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VARIABILIDAD EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA, ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, noviembre 2019

/mrm.

Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref.DTG.086.2020

La Decana 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: **DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VARIABILIDAD EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA, ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO**, presentado por el estudiante universitario: **José Luis Paz Ardón**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, Febrero de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Luis Paz y Thelma de Paz, por su apoyo y amor incondicional.
Mis hermanos	Giovanni, Manolo, Berner, Jessica, Fernando, Karina y Mauricio Paz Ardón, por apoyarme y creer en mí en todo momento.
Mis sobrinos	Con respeto y cariño a cada uno de ustedes por nombre propio.
Mi cuñada	Ligia de Paz, por su confianza en mi persona.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por permitirme en su infinita misericordia alcanzar esta meta en la vida.
Mis padres	Por el apoyo moral y económico que me brindaron a lo largo de la carrera.
Mis hermanos	Por apoyarme y en ningún momento dejar de confiar en mí.
Mi asesora	Inga. Karla Giovanna Pérez, por su ayuda y tiempo dedicado en la realización de este trabajo.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi gloriosa <i>alma máter</i> y casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos para mi formación profesional.
Mis amigos de la Facultad	A todos y cada uno gracias por estar allí y por las experiencias compartidas con cada uno de ustedes.
INSIVUMEH	Por brindarme la información necesaria para elaborar este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS.....	1
1.1. Estaciones meteorológicas.....	1
1.1.1. Clasificación de las estaciones meteorológicas.....	1
1.1.2. Descripción y funcionalidad los instrumentos meteorológicos	2
1.1.3. Variables que analizan las estaciones meteorológicas	4
1.1.4. Estación meteorológica automática (EMA).....	6
1.2. Estaciones hidrométricas.....	8
1.2.1. Generalidades	9
1.2.2. Funcionamiento	9
1.2.3. Limnímetros y limnógrafos.....	10
1.2.3.1. Limnómetro.....	10
1.2.3.2. Limnógrafo.....	11
1.2.4. Aforos	11

2.	CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS	13
2.1.	El sistema climático.....	13
2.2.	Agentes de cambio climático.....	13
2.3.	Causas naturales del cambio climático	14
2.3.1.	Movimiento orbital de la tierra	14
2.3.2.	Eje de rotación	15
2.3.3.	Rotación y traslación del planeta.....	15
2.3.4.	Solsticio de invierno	16
2.3.5.	La primavera y el equinoccio de otoño	16
2.3.6.	Solsticio de verano	16
2.3.7.	Variabilidad solar.....	17
2.3.8.	Tectónica de placas	18
2.3.9.	Actividad volcánica.....	19
2.4.	Causas humanas del cambio climático	19
2.4.1.	Deforestación	19
2.4.2.	Cambios en la cobertura vegetal y en los usos de la tierra	20
2.4.3.	La agricultura y la ganadería.....	20
2.4.4.	Incremento en el consumo de combustibles fósiles	21
2.4.5.	Los desechos sólidos	21
2.5.	Impactos del cambio climático	22
2.5.1.	Recursos hídricos e hidrología	22
2.5.2.	Recursos hídricos y clima.....	23
2.5.3.	Impacto en los recursos hídricos.....	23
3.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	25
3.1.	Ubicación y localización de la cuenca del río Motagua	25

3.2.	Poblaciones dentro de la cuenca.....	26
3.3.	Accesos y comunicaciones.....	27
3.4.	Descripción de la cuenca.....	28
3.5.	Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Motagua.....	28
3.6.	Geomorfología, climatología, aforos y parámetros hidrológicos	29
3.6.1.	Geomorfología.....	29
3.6.2.	Climatología, aforos y parámetros hidrológicos	30
3.7.	Climatología.....	31
3.8.	Geografía.....	31
3.9.	Geología y suelos.....	32
4.	APLICACIÓN Y ANÁLISIS EN LA ZONA DE ESTUDIO	35
4.1.	Metodología de la información.....	35
4.2.	Software RClimDex	35
4.2.1.	Control de calidad.....	37
4.2.1.1.	El control de calidad (QC) interno de RClimDex.....	37
4.2.1.2.	Control de calidad realizado por el usuario y control de homogeneidad.....	38
4.2.2.	Procesamiento de la información y generación de índices	38
4.2.3.	Datos	40
4.2.4.	Rangos y saltos de tiempo en datos.....	42
4.3.	Generación y gráfico de índices	49
4.4.	Gráficas de índices.....	52
4.4.1.	Gráficas de índices para la estación Puerto Barrios	53

4.4.2.	Gráficas de índices para la estación San Martín Jilotepeque	62
4.5.	Resultados	70
4.5.1.	Índices para la precipitación	70
4.5.2.	Índices para la temperatura media diaria	71
4.6.	Tendencia de la precipitación.....	71
4.6.1.	Tendencia de la precipitación total anual	72
4.6.2.	Tendencia de las precipitaciones fuertes	73
4.7.	Tendencia de la temperatura media diaria	74
4.7.1.	Tendencia de la temperatura máxima diaria mayor a 25 grados Celsius.....	75
4.7.2.	Tendencia de la temperatura mínima diaria mayor a 20 grados Celsius.....	76
4.8.	Tendencia de la evapotranspiración media anual	79
5.	ANÁLISIS DE CAUDALES.....	83
5.1.	Análisis de información	83
5.2.	Datos.....	83
5.2.1.	Rangos y saltos de tiempo en datos	85
5.3.	Generación y gráfico de índices.....	87
5.4.	Tendencia y resultados del caudal medio anual	91
5.5.	Tendencia del caudal extremo	93
5.6.	Comparación del caudal contra la precipitación	94
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA.....	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Instalaciones del INSIVUMEH.....	3
2.	Estación meteorológica automática	7
3.	Esquema de una estación limnimétrica.....	12
4.	Componentes del sistema climático mundial	14
5.	Solsticios y equinoccios	17
6.	La tectónica de placas.....	18
7.	Cuenca del río Motagua	26
8.	Poblados y vías de acceso dentro de la cuenca	27
9.	Plataforma inicial RClmDex.....	36
10.	Formato para ingreso de datos	40
11.	Ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas.....	41
12.	Estación Puerto Barrios, series de temperatura máxima (tmax)	43
13.	Estación Puerto Barrios, series de temperatura mínima (tmin)	44
14.	Estación Puerto Barrios, series de precipitación (prcp).....	45
15.	Estación San Martín Jilotepeque, series de temperatura máxima (tmax)	46
16.	Estación San Martín Jilotepeque, series de temperatura mínima (tmin)	47
17.	Estación San Martín Jilotepeque, series de precipitación (prcp).....	48
18.	Ventana inicial de software RClmDex	50
19.	Formulario para iniciar cálculo de índices	50
20.	Ventana de índices a analizar por software RClmDex	51

21.	Días al año cuando la temperatura mínima diaria es mayor a 20 °C (TR20).....	54
22.	Días al año cuando la temperatura máxima diaria es mayor a 25 °C (SU25)	55
23.	Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)	56
24.	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD).....	57
25.	Precipitación total al año (PRCPTOT)	58
26.	Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm (R10mm)	59
27.	Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm (R20mm)	60
28.	Número de días en un año, con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)	61
29.	Días al año cuando la temperatura mínima diaria es mayor a 20°C (TR20).....	62
30.	Días al año cuando la temperatura máxima diaria es mayor a 25 °C (SU25)	63
31.	Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)	64
32.	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD).....	65
33.	Precipitación total al año (PRCPTOT)	66
34.	Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm (R10 mm)	67
35.	Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm (R20 mm)	68
36.	Número de días en un año, con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)	69
37.	Indicador relacionado con la tendencia de la precipitación total anual (PRCPTOT).....	73
38.	Indicador relacionado con la tendencia de las precipitaciones fuertes o intensas (R95p).....	74
39.	Indicador relacionado con la tendencia de temperatura máxima diaria mayor a 25 °C (SU25).....	76

40.	Indicador relacionado con la tendencia de temperatura mínima diaria mayor a 20 °C (TR20)	77
41.	Distribución normal de la temperatura media de la cuenca del río Motagua	78
42.	Tendencia de la evapotranspiración real anual, estación Puerto Barrios.....	80
43.	Tendencia de la evapotranspiración real anual, estación San Martín Jilotepeque.....	81
44.	Ubicación de las estaciones hidrométricas analizadas	84
45.	Estación Chiché, series de caudal	85
46.	Estación Morales, series de caudal.....	86
47.	Caudal medio anual en la estación Chiché	88
48.	Caudal medio anual en la estación Morales.....	89
49.	Caudal medio anual en la estación Puente Orellana	90
50.	Caudal medio anual en la estación Camotán.....	91
51.	Indicador relacionado con la tendencia del caudal medio anual	93
52.	Caudal extremo en estación Morales	94

TABLAS

I.	Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca	29
II.	Estaciones meteorológicas analizadas	41
III.	Listado de índices analizados	52
IV.	Resumen de índices para la precipitación.....	70
V.	Resumen de índices para la temperatura media diaria	71
VI.	Resumen de índices para la evapotranspiración real anual.....	81
VII.	Estaciones hidrométricas analizadas	84
VIII.	Resumen de índices para el caudal medio anual.....	92

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C	Caudal
σ	Desviación estándar
CO₂	Dióxido de carbono
E_{vp}	Evapotranspiración
°C	Grados Celsius
km	Kilómetros
km²	Kilómetros cuadrados
m³	Metros cúbicos
m³/año	Metros cúbicos por año
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm/año	Milímetro por año
mm	Milímetros
P	Precipitación
T	Temperatura
T_{máx}	Temperatura máxima
T_{mín}	Temperatura mínima

GLOSARIO

Afluente	Río tributario de otro.
Año hidrológico	División anual que principia en el mes en el que se considera que empieza la época de lluvias o invierno en los diferentes países. En el caso de Guatemala, el año hidrológico inicia el 1 de mayo y finaliza el 30 de abril del año siguiente.
Atmósfera	Conjunto de gases y aerosoles que envuelven al planeta tierra y que comúnmente se conoce como el aire.
Biosfera	Es el sistema formado por el conjunto de los seres vivos propios del planeta tierra, junto con el medio físico que les rodea y que ellos contribuyen a conformar.
Cuenca	Depresión de terreno cuyas aguas afluyen al mismo cuerpo de agua, es decir, un territorio que drena sus aguas naturalmente.
Estación hidrométrica	Estación para la medida regular del caudal de una corriente.

Estación meteorológica	Es el lugar donde se efectúan observaciones meteorológicas o climatológicas para fines de predicciones climáticas.
Excentricidad	Es la forma de la órbita terrestre que acentúa las diferencias climatológicas entre las estaciones.
Hidrología	Ciencia que trata de las características y propiedades del agua sobre el suelo y en su interior, y principalmente de la distribución del agua procedente de lluvias.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
R	Es un lenguaje y ambiente computacional para cálculos y gráficos estadísticos.
RClimDex	Es un programa basado en Microsoft Excel, el cual proporciona un paquete computacional para el cálculo de índices de extremos climáticos para monitorear y detectar variaciones climáticas.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se analizaron cuatro variables hidrometeorológicas para la cuenca del Río Motagua, las cuales son: precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal. Dicho análisis se realizó a través de los datos recopilados de las diferentes estaciones meteorológicas e hidrométricas instaladas dentro de la cuenca, esto con el fin de determinar si estas variables han sufrido modificaciones debido al cambio climático.

Para efectuar el análisis de las variables antes mencionadas se recopiló la información proveniente de las estaciones meteorológicas e hidrométricas pertenecientes al INSIVUMEH, utilizando para ello datos históricos desde el año 1975 al 2015, luego mediante el software RClimDex la información pasó por procesos de control de calidad, con el objetivo de ser utilizada posteriormente en el cálculo de índices y análisis de tendencias, lo cual permitió establecer la manera en la que el cambio climático repercute sobre los recursos hídricos de la cuenca como lo son: lagos, lagunas, ríos, arroyos, entre otros.

OBJETIVOS

General

Determinar el comportamiento cuantitativo de los recursos hídricos en la cuenca del río Motagua, asociado al cambio climático.

Específicos

1. Establecer la tendencia de la variabilidad en los niveles de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal de la cuenca del río Motagua.
2. Determinar si existe alguna correlación entre los factores de precipitación y caudal en la cuenca del río Motagua.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el cambio climático es uno de los problemas más graves que enfrenta el planeta, en el caso de Guatemala los impactos de dicho cambio han puesto y siguen poniendo en peligro la vida, su calidad y los medios que la sustentan, tal es el caso de los recursos hídricos. Entre los fenómenos meteorológicos, asociados al cambio climático, que pueden llegar a afectar dichos recursos para una determinada zona o una región se pueden mencionar: tormentas tropicales, tifones, huracanes, sequías, heladas, vientos, entre otros, los cuales pueden traer consigo un desequilibrio ambiental, tal como fue el caso de la tormenta tropical Agatha, por citar un ejemplo, que en su momento afectó seriamente algunas cuencas de Guatemala.

A nivel nacional cada vez son más latentes los efectos del cambio climático, por un lado se tienen inundaciones y periodos de canícula cada vez más prolongados, estos eventos climáticos tienen repercusiones a nivel del ecosistema y por consiguiente afectan la red de cuencas hidrográficas que conforman el territorio nacional.

En la actualidad existen trabajos de investigación relacionados al cambio climático y sus impactos sobre los recursos hídricos para algunas cuencas en específico, sin embargo, es de hacer mención que son escasos o inexistentes los documentos que primordialmente tengan como objeto de estudio la cuenca del río Motagua.

En el presente trabajo de graduación se presenta el análisis específicamente de la precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal

para la cuenca del río Motagua, a través de los registros de las estaciones hidrométricas y meteorológicas que el INSIVUMEH posee dentro de la cuenca, además se pretende investigar si existe alguna tendencia en la variabilidad de los parámetros hidrometeorológicos antes mencionados y con esto establecer las repercusiones que el cambio climático tiene sobre los recursos hídricos de la cuenca del río Motagua.

1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS

1.1. Estaciones meteorológicas

Una estación meteorológica es una instalación destinada a realizar mediciones y observaciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos, utilizando para ello los instrumentos adecuados para así poder establecer el comportamiento atmosférico y además crear modelos para predecir las condiciones futuras.

1.1.1. Clasificación de las estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas miden precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación, radiación, presión, dirección y velocidad del viento, entre otros.

Dependiendo de la cantidad de parámetros que miden, las estaciones se clasifican en los siguientes cinco tipos:

- Tipo A: estación donde se registra la lluvia (cantidad, duración e intensidad), la temperatura (máxima y mínima), la humedad relativa, la presión, el viento (dirección, recorrido y ráfaga máxima), la radiación y las horas de sol en registro gráfico continuo. Además, observaciones directas de la evaporación y la temperatura del suelo.
- Tipo B: estación donde se registra la lluvia (cantidad, duración e intensidad), las temperaturas extremas y la humedad relativa a las 07:00, 13:00 y 18:00 horas.
- Tipo PG: estación pluviográfica que indica la distribución temporal de la lluvia. Además de proporcionar un registro continuo, nos permite calcular la intensidad de la misma.

- Tipo PV: estación pluviométrica que mide la cantidad de lluvia todos los días a las 07:00 a.m.
- Tipo TM: estación que reporta el dato climatológico en tiempo real cada 3 horas.¹

1.1.2. Descripción y funcionalidad los instrumentos meteorológicos

Para efectuar un estudio meteorológico es necesario tomar mediciones periódicas del clima circundante a la región de interés, y para lograr una correcta medición de estos aspectos climáticos existen instrumentos precisos. Una correcta medida de ciertos elementos meteorológicos depende de la instalación adecuada de los instrumentos, por lo que una correcta instalación de los mismos deberá ser tal que sea un indicador significativo de las condiciones del medio que le rodea, por lo que el terreno donde se encuentra instalada la estación deberá ser plano y libre de obstrucciones y obstáculos, cumpliendo los siguientes requisitos:

- Regularidad en su funcionamiento
- Construcción sólida y comodidad en el manejo de la misma
- Precisión en los resultados
- Niveles de incertidumbre aceptables según normas

Los instrumentos meteorológicos se pueden dividir en dos categorías fundamentales de acuerdo con el modo de realizar la lectura: instrumentos de lectura directa e instrumentos registradores.

¹ Contraloría General de Cuentas. *Clasificación de estaciones*. <https://www.contraloria.gob.pa/inec/Archivos/P279105definicion.pdf>.

Los instrumentos de lectura directa son más precisos, pero cada medida necesita una lectura, mientras que los registradores se refieren a instrumentos en los cuales el movimiento de las partes móviles contiene mecanismos internos, los cuales registran, sobre una banda de papel, las mediciones observadas para su posterior lectura.

En Guatemala, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), cuenta con el equipo e instalaciones adecuadas para llevar a cabo estas mediciones meteorológicas de una manera precisa a cada determinado tiempo, llevando así un registro de las mediciones obtenidas, ya sea para realizar futuras predicciones o para llevar un registro adecuado sobre las condiciones meteorológicas del país.

Figura 1. **Instalaciones del INSIVUMEH**



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Instalaciones. <https://insivumeh.gob.gt/>. Consulta: 11 de mayo de 2019.

1.1.3. Variables que analizan las estaciones meteorológicas

- Tiempo

Son las condiciones atmosféricas durante un corto periodo de tiempo, estas condiciones cambian día con día y su predicción debe hacerse de manera continua, esto con el fin de poder determinar cualquier cambio repentino.

Dependiendo del lugar, los cambios del tiempo pueden darse de hora en hora o de temporada en temporada. Los componentes del tiempo son: el sol, la lluvia, la nubosidad, vientos, granizo, nieve, lluvia helada, inundaciones, tormentas eléctricas, frente frío y frente cálido, entre otros.

- Clima

El clima se refiere a las condiciones ambientales promedio que se esperan en un lugar durante un periodo prolongado de tiempo, que en muchos casos suelen demorar años.

- Viento

Es el aire en movimiento, por regla general la dirección del viento varía y su velocidad aumenta con la altitud. El viento en superficie raramente es constante durante un periodo determinado, además varía rápida y constantemente, por lo que dichas variaciones son irregulares tanto en frecuencia como en duración.

- Humedad relativa

La humedad relativa es el porcentaje de la humedad de saturación, que se calcula normalmente en relación con la densidad del vapor de saturación.

- Temperatura

Se refiere al grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinado, además es una de las variables meteorológicas más importantes e influyentes en el clima de una región.

La variación en el ángulo de incidencia de los rayos solares, que depende de la latitud, es el principal factor que produce cambios de la temperatura del aire sobre el planeta, este factor provoca que, por ejemplo, las zonas tropicales sean cálidas y que la temperatura disminuya hacia los polos.

Actualmente se utilizan tres escalas para medir la temperatura, la escala Celsius, utilizada en la mayoría de países, la escala Fahrenheit, utilizada en los países anglosajones, y la escala Kelvin que es de uso científico.

- Presión atmosférica

Se conoce como presión atmosférica a aquella presión que ejerce el aire en cualquier punto de la atmósfera. Cuando el aire se encuentra muy frío, la atmósfera es estable, presentando niveles de presión atmosférica estables, pero cuando el aire cambia drásticamente su temperatura se pueden producir cambios bruscos de presión, lo que conduce a ciclones y huracanes que perturban la atmósfera.

El valor medio de la presión atmosférica terrestre es de 1 013,25 milibares a nivel del mar, la cual está medida a una latitud de 45°.

- Evaporación

La evaporación es el fenómeno en donde el agua cambia de fase líquida a gaseosa, es decir, meteorológicamente hablando, a través de este proceso el agua del suelo es devuelta a la atmósfera. Los índices de evaporación del agua dependen de varios factores tales como la radiación solar, la temperatura, la humedad y el viento.

- Radiación solar

Tiene como fuente el sol y se propaga por medio de ondas electromagnéticas que se difunden en todas las direcciones. La energía solar se absorbe en parte por ciertos elementos de la atmósfera como: el oxígeno, el ozono y el vapor de agua, y por otra parte es difundida por el polvo, la nubosidad y el humo.

- Precipitación

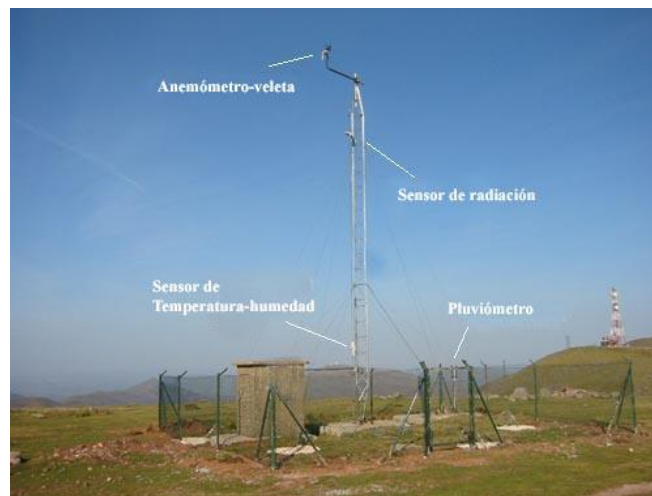
Se entiende como el volumen de lluvia que llega al suelo en un periodo determinado, se expresa en función del nivel que alcanzaría sobre la superficie de la tierra.

1.1.4. Estación meteorológica automática (EMA)

Este sistema puede reportar en tiempo real, las condiciones en un determinado sitio y momento, ya que es una versión automatizada de la tradicional estación meteorológica, la cual permite ahorrar labor humana, o realizar mediciones en áreas remotas o salvajes.

Este tipo de estaciones, además permite llevar un registro detallado y continuo de información climática a intervalos regulares que pueden ser, en algunos casos, definidos por el usuario, por ejemplo, cada 15 minutos, durante las 24 horas del día, los 365 días del año.²

Figura 2. **Estación meteorológica automática**



Fuente: Google. *EMA*. <https://goo.gl/images/q73SaJ>. Consulta: 8 de junio de 2017.

Los instrumentos que registran los datos climáticos (radiación solar, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, entre otros), corresponden a sensores o registradores electrónicos que miden estas variables y las transforman en datos que puede leer el usuario en su computador. Entre las ventajas y desventajas que presentan las estaciones meteorológicas automáticas se mencionan:

² Universidad Nacional de Asunción, Paragua, Facultad Politécnica. *Estación meteorológica automática*.

- Ventajas
 - Integra todas las variables climáticas (según los sensores que se le instalen).
 - Mayor precisión en la estimación del consumo de agua del cultivo, ya que si es bien mantenida, la precisión de la estimación en la evapotranspiración es mayor que la bandeja de evaporación.
 - Registro detallado y continuo de la información climática.

- Inconvenientes
 - Costo de implementación alto (normalmente la inversión inicial).
 - Requiere personal capacitado para su manejo.
 - Daños por terceros: a veces la estación puede ser robada desde el campo, o bien sus sensores pueden ser manipulados o abiertos por curiosos, por lo que es importante dejarla bien resguardada.

1.2. Estaciones hidrométricas

Son instalaciones destinadas a obtener datos sobre el agua de ríos, lagos o embalses, referidos a uno o más de los elementos siguientes: nivel, caudal, transporte y depósito de los sedimentos, temperatura del agua y otras propiedades físicas del agua, características de la capa de hielo y propiedades químicas del agua.

1.2.1. Generalidades

El objetivo para el cual se diseñan las estaciones hidrométricas es el de obtener datos sobre el comportamiento de ríos, lagos o embalses, tomando como indicador uno o más de los elementos siguientes: nivel, caudal, arrastre y depósito de sedimentos, temperatura y otras propiedades físicas del agua.

1.2.2. Funcionamiento

Las estaciones hidrométricas consisten esencialmente en una o varias reglas graduadas (escala o limnómetro) colocadas verticalmente y perfectamente niveladas entre sí y con referencia a un plano dado en una sección de río, arroyo, laguna o embalse.

Mediante el auxilio de un operador que reside o trabaja en las proximidades de la estación se registran en planillas los niveles observados a horas preestablecidas y todo evento relevante para el funcionamiento de la estación.

Los caudales se determinan mediante mediciones directas de caudal (aforos) que se correlacionan con las lecturas de nivel simultáneas. Cuando se cubre con aforos suficientes una parte significativa del rango de variación de niveles se define la ecuación de caudales o curva de aforo característica para cada estación. Las estaciones hidrométricas deberán cumplir como mínimo con las condiciones siguientes:

- **Accesibilidad:** la estación debe ser visitable en cualquier momento, sobre todo en avenidas.

- Suficiencia: debe cubrir todo el rango de caudales, desde el mínimo hasta el máximo posible.
- Estabilidad: la estación debe mantenerse con las características geométricas iniciales, además que esté situada en un tramo recto para que la inercia en curva del flujo no afecte a la lectura.
- Permanencia: la estación debe estar situada y construida de forma que las avenidas no la deterioren, esto no siempre es así, pues una avenida muy elevada cambia su comportamiento natural de llevar solo agua y comienza a transportar sedimento, con lo que es muy probable que las laderas del cauce se vean afectadas.

1.2.3. Limnímetros y limnígrafos

El método que se usa corrientemente para aforar un río es mediante el empleo del limnómetro o limnígrafo, puesto que usar frecuentemente el correntómetro resulta poco práctico por lo difícil y tedioso de realizar las mediciones con este instrumento.

1.2.3.1. Limnómetro

Un limnómetro es simplemente una regla parecida a un estadal de topógrafo, graduada en centímetros, por lo que basta con leer, en la escala o mira, el nivel que alcanza el agua para saber el caudal de agua que pasa en este momento por la conducción libre, pero previamente se tiene que calibrar la escala o mira reseñada.

La calibración del limnómetro consiste en aforar el río varias veces durante el año, en épocas de estiaje y épocas de avenidas, por el método de molinete, y anotar cuidadosamente la altura que alcanzó el agua, medida con el limnómetro.

El limnómetro siempre debe colocarse en el mismo sitio cada vez que se hacen las lecturas y su extremidad inferior siempre debe estar sumergida en el agua, considerando que, por lo general, las lecturas de la altura del agua deben hacerse tres veces en el día, a las 6 a.m., 12 p.m. y 6 p.m. para obtener el caudal medio diario.

1.2.3.2. Limnógrafo

Una mejor manera de aforar el agua es empleando un limnógrafo, el cual tiene la ventaja de poder medir o registrar los niveles de agua en forma continua en un papel especialmente diseñado, que gira alrededor de un cilindro movido por un mecanismo eléctrico o de relojería.

Los limnógrafos están protegidos dentro de una caseta de obra de fábrica, además vienen acompañados de las instrucciones precisas para su operación y cuidado, así como de un sistema de transmisión de datos por teleproceso.

1.2.4. Aforos

Aforar una corriente en una sección consiste en determinar el gasto de que pasa en ese lugar, en la unidad de tiempo.

Existen diversos métodos para aforar una corriente, dependiendo de las características del río por medir, así como el equipo disponible; entre los principales métodos de aforo es posible mencionar:

- Aforo por el método del molinete
- Aforo con limnímetros y limnigrafos
- Aforo con flotadores
- Aforos con trazadores químicos y radioactivos
- Aforo con vertederos y canaletas
- Aforo volumétrico
- Aforo con tubo de pitot

Figura 3. **Esquema de una estación limnimétrica**



Fuente: OMM. *Guía de prácticas hidrológicas*. p. 29.

2. CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

2.1. El sistema climático

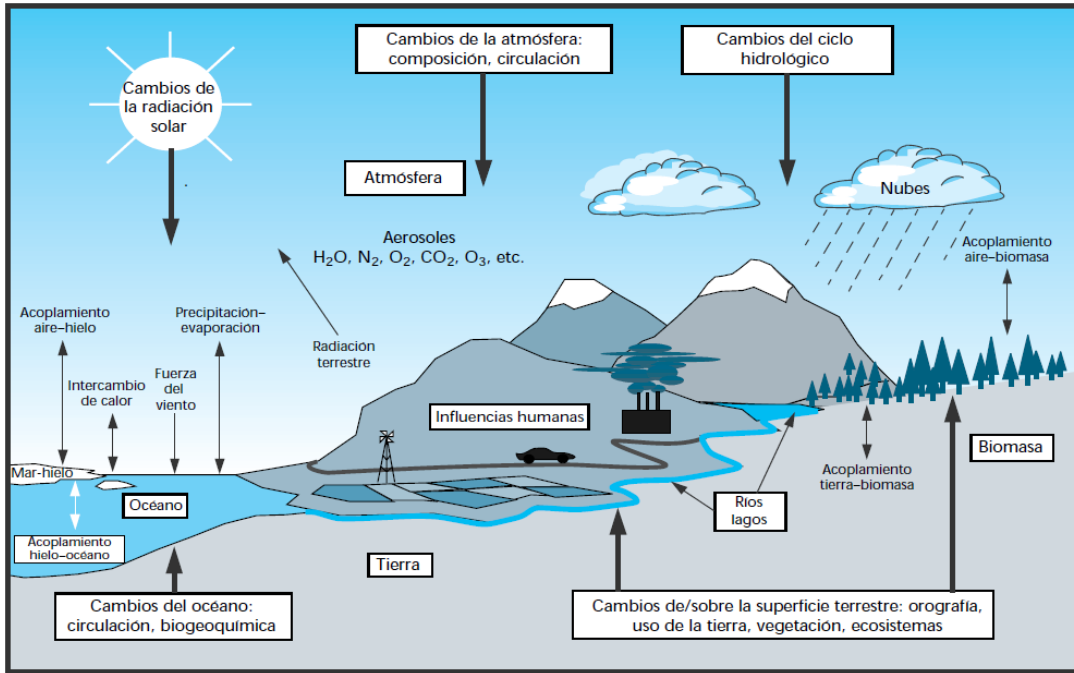
El sistema climático es el resultado de la interacción de una serie de subsistemas, los cuales poseen diversas características físicas que se expresan a través de fuertes vínculos, por medio de las cuales se transfiere energía, momento y materia.

Los subsistemas que conforman de manera global el sistema climático son la atmósfera, la litoósfera, la hidrósfera, la criósfera y la biósfera. Todos estos subsistemas se hallan controlados por la influencia de la radiación solar, la única fuente de energía de aporte significativo.

2.2. Agentes de cambio climático

El clima de la tierra como tal es dinámico y cambiante y desde siempre ha seguido un ciclo natural, el problema surge cuando el hombre, debido a sus actividades cotidianas, acelera dichos cambios, es por eso que las causas del cambio climático se pueden dividir en dos categorías: las que se deben a causas naturales y las antropogénicas, es decir, provocadas por el hombre.

Figura 4. Componentes del sistema climático mundial



Fuente: WordPress. *Sistema climático mundial*.

<https://perspectivaclimaticaterritorial.files.wordpress.com/2011/09/sistema-climatico-global2.png>

Consulta: 8 de junio de 2017.

2.3. Causas naturales del cambio climático

Son consideradas como causas naturales aquellas que no son producidas por la actividad humana, entre las que se cuentan las siguientes:

2.3.1. Movimiento orbital de la tierra

El cambio climático de la Tierra es causado por la inclinación del eje de la Tierra y su órbita elíptica alrededor del sol, ya que la luz del sol llega a la superficie del planeta en diferentes ángulos durante un recorrido de año de

duración, provocando que diversas partes experimenten las diferentes estaciones debidas al cambio en la cantidad de calor y de luz.

No hay ningún cambio notable de estación en el ecuador, donde la cantidad de luz solar y la fuerza es relativamente constante durante todo el año.

2.3.2. Eje de rotación

El eje de rotación de la Tierra es de 23,5 grados en relación a su plano orbital, el mismo está constantemente apuntando en la misma dirección independientemente del movimiento del planeta. La inclinación produce diferentes cantidades de exposición al sol al hemisferio sur o norte, dependiendo del lugar en donde se encuentra el planeta Tierra con relación al sol.

2.3.3. Rotación y traslación del planeta

La Tierra gira de oeste a este sobre su propio eje, si se toma al polo norte como punto de vista la Tierra gira en sentido antihorario, es decir de derecha a izquierda. Un giro completo en relación al sol dura 23 horas, 56 minutos y 4 segundos.

La Tierra viaja con una trayectoria elíptica alrededor del sol, completando una vuelta cada 365 días y cinco horas, durante este viaje la inclinación de la Tierra presenta diferentes aspectos de su superficie hacia el sol.

2.3.4. Solsticio de invierno

En el solsticio de invierno el hemisferio inclinado más alejado del sol experimenta la noche más larga y el día más corto del año. La luz solar que llega a este hemisferio golpea la superficie en un ángulo más pequeño, esto hace que la misma cantidad de luz se extienda sobre un área mayor, provocando que haya menos calor, además hay menos horas de luz cada día que la tierra se acerca el solsticio.

2.3.5. La primavera y el equinoccio de otoño

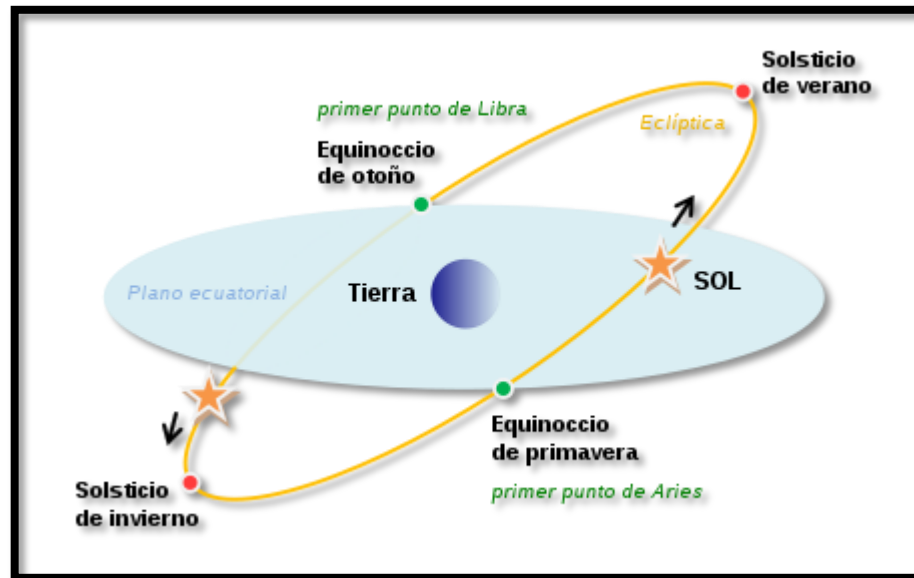
A medida que la tierra se mueve a lo largo de la trayectoria elíptica, no apunta ni cerca ni lejos del sol, ambos hemisferios reciben la misma cantidad de luz durante la primavera y el día del equinoccio otoñal.

El hemisferio que abandona al invierno tendrá días cada vez más largos con noches más cortas a medida que el eje del planeta se mueve para exponer ese hemisferio al sol más directamente.

2.3.6. Solsticio de verano

El hemisferio experimentando verano y avanzando hacia el solsticio de verano recibe más luz solar directa que en cualquier otro punto del ciclo, este aumento en la luz directa también aumenta el calor para ese hemisferio durante este tiempo.

Figura 5. Solsticios y equinoccios



Fuente: Google. *Solsticios y equinoccios*. <https://goo.gl/images/dq4GbV>. Consulta: 8 de junio de 2017.

El solsticio de verano es el período de luz más largo del día, y el polo del hemisferio tendrá 24 horas de luz. El hemisferio opuesto experimentará el solsticio de invierno ese mismo día.

2.3.7. Variabilidad solar

El sol es una estrella variable y por consecuencia, la energía por él emitida varía con el paso del tiempo. Su efecto es claro: un aumento (disminución) de la energía recibida del sol produce un calentamiento (enfriamiento) en el sistema tierra - atmósfera.³

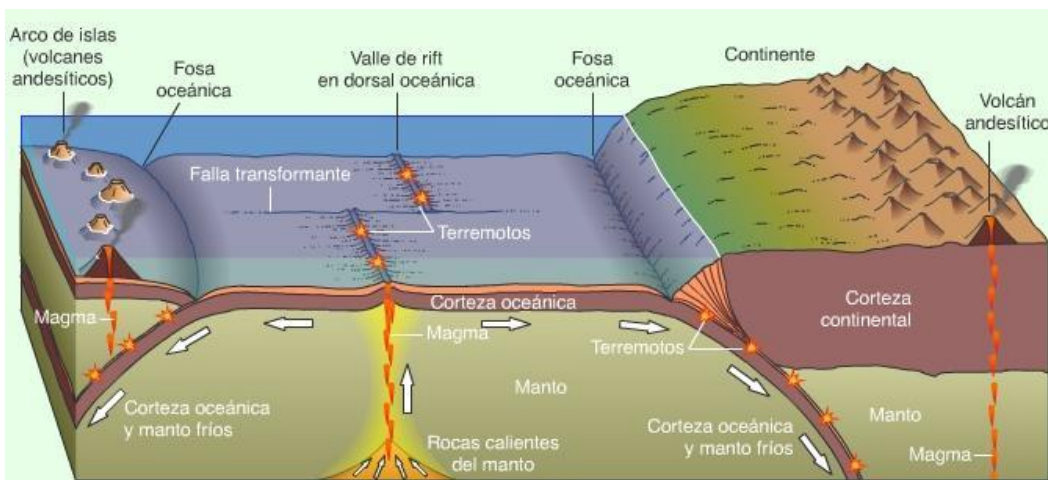
³ Gobierno de Canarias, Escuela y Cambio Climático. *Variabilidad solar*.

Si la radiación solar se incrementa en el futuro, tal como ha ocurrido en los últimos 50 años, entonces se reforzará el efecto invernadero, de lo contrario podría haber una pequeña atenuación del mismo.

2.3.8. Tectónica de placas

“Los continentes están acomodándose y reubicándose de manera muy lenta, acercándose o alejándose hacia los polos, el Ecuador o hacia cualquier otra dirección, teniendo como consecuencia lentos cambios en el clima del globo terráqueo.”⁴

Figura 6. La tectónica de placas



Fuente: Recursos TIC. *Tectónica de placas*. <http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esobiologia/4quincena4/imagenes4/limites.JPG>. Consulta: 11 de junio de 2017.

⁴ Gobierno de Canarias, Escuela y Cambio Climático. *Tectónica de placas*. <http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esobiologia/4quincena4/imagenes4/limites.JPG>.

2.3.9. Actividad volcánica

Cuando la actividad volcánica es lo suficientemente intensa, en la atmósfera se pueden acumular gran cantidad de cenizas y gases contaminantes, los cuales a su vez pueden permanecer por mucho tiempo suspendidos en el aire, atenuando la radiación solar que llega a la superficie, produciendo con esto las correspondientes alteraciones en el comportamiento climático.

2.4. Causas humanas del cambio climático

Hasta hace poco el ser humano no era un agente de cambio climático de mayor importancia, sin embargo, hasta hace poco su influencia comenzó con la deforestación de los bosques para convertirlos en tierras de cultivo y pastoreo, llegando a la emisión de gases de efecto invernadero: CO₂ en fábricas y medios de transporte y metano en granjas de ganadería intensiva y arrozales.

Actualmente, tanto las emisiones de gases como la deforestación se han incrementado hasta tal nivel que parece difícil que se reduzcan a corto y mediano plazo, por las implicaciones técnicas y económicas de las actividades involucradas.

2.4.1. Deforestación

Actividades tales como la agricultura, la minería y la ganadería son consecuencia directa de la intervención del hombre en las superficies o áreas verdes, y son las que normalmente dan como resultado la deforestación y quema de árboles para justamente proveerse de materias primas y usar indiscriminada y descontroladamente los suelos para su propio beneficio.

2.4.2. Cambios en la cobertura vegetal y en los usos de la tierra

Los cambios en los usos de la tierra y en la cobertura vegetal tienen tres consecuencias fundamentales y que afectan de manera muy importante al clima y a los ecosistemas:

- Influyen en los flujos de carbono (alterando y aumentando la cantidad del carbono en la atmósfera debido a la tala) y en las emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales alteran directamente la composición de la atmósfera.
- Modifican las características de la superficie terrestre e indirectamente los procesos climáticos, ya que los árboles, por citar un ejemplo, participan en el ciclo del agua, ayudando a que se den mayores precipitaciones gracias a su aportación de agua a la atmósfera a través de la evapotranspiración, por lo que su tala inmoderada disminuirá bastante la posibilidad de precipitaciones.
- La modificación y conversión de la cobertura vegetal pueden alterar las propiedades de los ecosistemas y su vulnerabilidad al cambio climático.

2.4.3. La agricultura y la ganadería

La agroindustria que tiene como eje principal el uso excesivo de químicos, da como resultado la degradación y destrucción del suelo y los recursos que son fundamentales para la fijación de carbono, como los bosques y el resto de comunidades vegetales. La agricultura genera los mayores daños al ecosistema debido al uso excesivo de fertilizantes, ya que más de la mitad de todos los

fertilizantes aplicados a los suelos se dispersan en el aire o acaban en los cursos de agua. Las soluciones son las prácticas agrarias sostenibles que fijan carbono en el suelo y la reducción en el uso de fertilizantes.

En la actualidad la ganadería es la segunda mayor fuente de emisiones agrícolas, ya que los animales, al digerir los alimentos, producen grandes cantidades de metano, un potente gas de efecto invernadero. También se producen purines -mezcla de los excrementos líquidos y sólidos junto con las aguas residuales del ganado- que acarrearán una problemática en aumento debido a la contaminación del suelo y a la emisión de gases.

2.4.4. Incremento en el consumo de combustibles fósiles

Actualmente, reducir el elevado consumo de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) es, sin duda, uno de los desafíos en la lucha contra el cambio climático. La reducción de dicho consumo puede contribuir en mejorar la salud del planeta Tierra, sin embargo, algunas de las fuentes de energía alternativas planteadas (tales como la energía nuclear) no parecen convencer a todos, teniendo en su contra muchos otros efectos negativos.

2.4.5. Los desechos sólidos

En la actualidad el ciclo de consumo humano se cierra mayoritariamente con un residuo, vinculado a cualquiera de los distintos estadios del ciclo: la bolsa de transporte, el embalaje, el envase directo (casi siempre de un solo uso), los restos de los alimentos que se consumen o los productos viejos o estropeados que al ser sustituidos se convierten, de manera general, en un residuo. La descomposición de la basura orgánica, al igual que la quema de restos orgánicos, produce grandes cantidades de gas metano, el cual es un

importante causante del efecto invernadero. La basura orgánica es un residuo valiosísimo que debe ser reincorporada al ciclo vital del suelo de forma urgente.

2.5. Impactos del cambio climático

El enfoque primordial que se pretende con este trabajo de graduación es poder identificar la manera en que varían los recursos hídricos en la cuenca del río Motagua, así como el impacto que el mismo ha recibido a causa del cambio climático en el territorio de Guatemala.

2.5.1. Recursos hídricos e hidrología

Es sabido que el clima influye grandemente sobre el ciclo hidrológico, de manera que el mínimo cambio en los elementos del ciclo del agua, así como variaciones en las precipitaciones, determinan y desencadenan cambios en el comportamiento habitual de la escorrentía y eventos extremos asociados a la lluvia, de igual manera las variaciones térmicas son las que modifican los balances de la evapotranspiración, humedad en el suelo e infiltración a capas más profundas de la corteza terrestre.

Actualmente los diferentes modelos climáticos pronostican un aumento de la temperatura a escala global, el cual vendrá a incrementar las tasas de evaporación del agua, deshielo de los glaciares y de los casquetes polares, lo que provocará modificaciones en los patrones de precipitación y de humedad en la atmósfera, así como alteraciones en las descargas hídricas de los ríos y la cantidad de agua almacenada en los suelos, lo cual dará como resultado una mayor ocurrencia y severidad de los eventos meteorológicos extremos, entiéndase inundaciones y sequías, con los cuales se pone en riesgo la

sostenibilidad de los sistemas productivos, la seguridad alimentaria y la provisión de gran parte de los servicios vinculados con el recurso hídrico.

Los impactos hidrológicos asociados al cambio climático dependerán en gran parte de la región en consideración, tal es el caso de muchas regiones semiáridas del planeta en donde con base en predicciones recientes se prevé una reducción de la descarga de los ríos y un aumento de periodos con escasez de agua, situación que pondrá de manifiesto un incremento en la demanda de agua subterránea y los niveles de sobreexplotación de los acuíferos, limitando la capacidad de los mismos para hacer frente a situaciones climatológicas adversas.

2.5.2. Recursos hídricos y clima

Si el cambio climático se ve potencializado por factores naturales o antropogénicos o algún otro elemento que constituye el clima en determinada región, el recurso hídrico en referida zona se verá afectado directamente, si este recurso se utiliza por ejemplo para: consumo humano, uso agroindustrial e inclusive la fauna marina y las actividades que de ella dependan, entre otros.

2.5.3. Impacto en los recursos hídricos

Los estudios científicos pronostican el aumento de la magnitud y frecuencia de fenómenos meteorológicos como lo son huracanes, tormentas tropicales y depresiones que se traducen en inundaciones y periodos de sequía para el territorio nacional.

Además las erupciones volcánicas, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la actividad industrial local del país, no solo contaminan el

entorno sino que aceleran los efectos de degradación ambiental que tendrá el país debido al cambio climático.

Una manera coherente de reducir los efectos negativos del cambio climático es que todas las personas reaccionen consciente y decididamente en beneficio del planeta, esto debido a que cualquier efecto en el clima, inducido por la actividad humana, está sobrepuesto a una variabilidad natural del clima, esto debido a fluctuaciones internas y a causas externas como la variación solar y a erupciones volcánicas.

Asimismo, según las evaluaciones e investigaciones que realizó el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala, los eventos naturales perjudican la calidad y cantidad de recursos hídricos y con esto aumentan la degradación del suelo, provocando serios impactos en los sectores sociales, económicos y ambientales del país, ya que incrementan los niveles de pobreza, reducen la calidad de vida de las personas y aumentan las amenazas en los medios de subsistencia.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

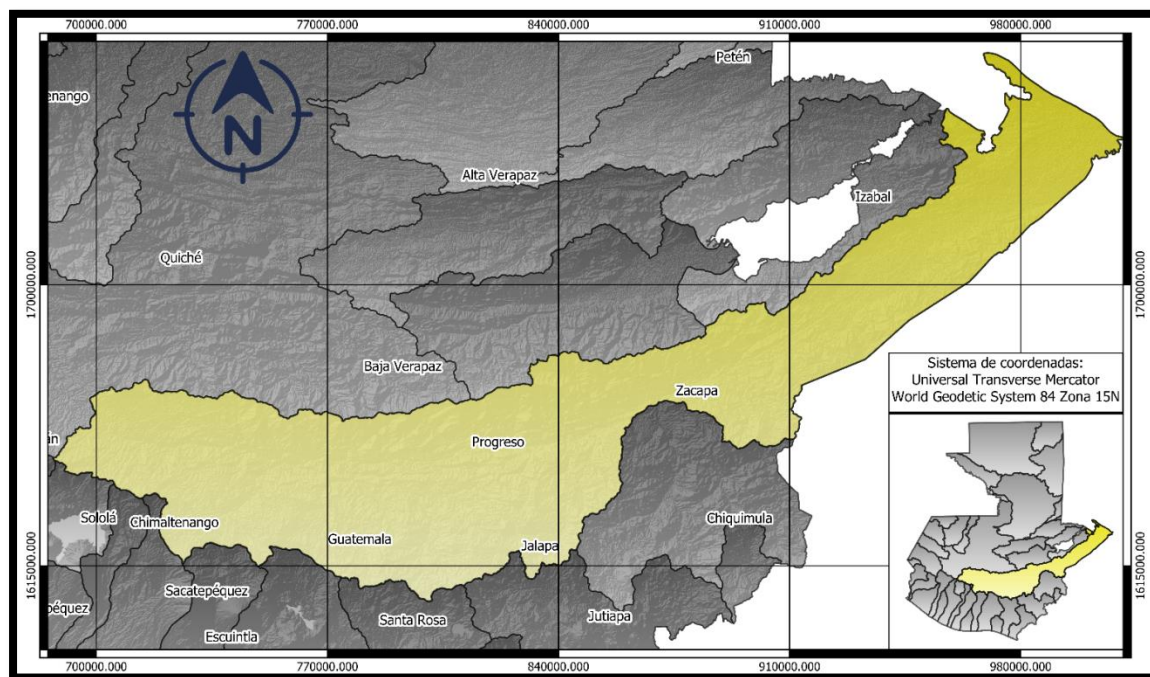
3.1. Ubicación y localización de la cuenca del río Motagua

La cuenca del río Motagua se encuentra geográficamente situada entre los meridianos 88° 15' y 91° 15' de longitud oeste y entre los paralelos meridianos 14° 30' y 16° 00' de latitud norte, el río nace en el municipio de Quiché, ubicado en el altiplano occidental de Guatemala, lugar donde también se le conoce como río Grande, y recorre el oriente hasta desembocar en el mar del Caribe, cerca de Puerto Barrios, Izabal.

En sus últimos kilómetros el río Motagua marca la frontera entre Guatemala y Honduras. La cuenca tiene una superficie de 12 670 km² y ocupa alrededor del 8,5 % del total del país, convirtiéndola en una de las más grandes de territorio guatemalteco.

A continuación se muestra la cuenca del río Motagua delimitada por una línea, la cual indica el área que se estudiará, así mismo se muestran también los departamentos que conforman dicha cuenca.

Figura 7. Cuenca del río Motagua



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS y modelo de elevación digital.

3.2. Poblaciones dentro de la cuenca

Actualmente la población dentro de la cuenca del río Motagua abarca un total de trece departamentos, que son: Alta Verapaz, Baja Verapaz, Chimaltenango, Guatemala, Izabal, Jalapa, El Progreso, Quiché, Sacatepéquez, Zacapa, Chiquimula, Sololá y Tonicapán.

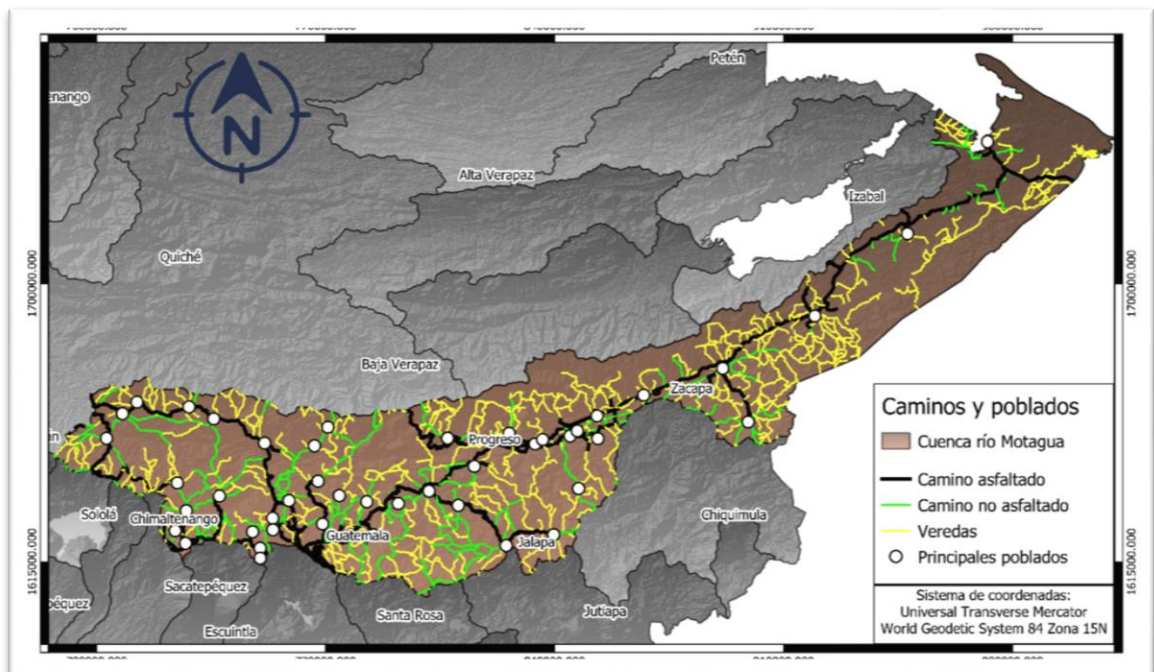
Dentro de los principales poblados se pueden mencionar la mayoría de las cabeceras municipales. En el occidente se pueden destacar: Santa Cruz del Quiché, Chiché, Chinique, Zacualpa, Joyabaj, Pachalum, Chichicastenango, San José Poaquil, Santa Apolonia, San Martín Jilotepeque, San Juan

Comalapa, Tecpán, Zaragoza y Chimaltenango. También una buena parte de la ciudad capital, Fraijanes, Mixco, Palencia, San Raymundo, San José del Golfo, San Pedro Ayampuc, Chinautla, Santa Catarina Pinula, San José Pinula, todas las del departamento de El Progreso y Zacapa y algunas de Jalapa, Baja Verapaz, Sacatepéquez e Izabal.

3.3. Accesos y comunicaciones

Se muestran a continuación las carreteras y caminos localizados dentro de la cuenca del río Motagua, las cuales sirven de acceso y vías de comunicación entre los diferentes poblados localizados dentro de la cuenca.

Figura 8. Poblados y vías de acceso dentro de la cuenca



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS y modelo de elevación digital con datos del Instituto Geográfico Nacional.

3.4. Descripción de la cuenca

El río Motagua es el cauce principal de la cuenca del mismo nombre, teniendo un área de 12 670 km² y ocupando alrededor del 8,5 % del total del país, es considerada una de las cuencas más grandes del país, dado que su longitud es aproximadamente de 486,5 kilómetros, extendiéndose de occidente a oriente.

Desde su nacimiento en el municipio de Chiché, ubicado en el altiplano del departamento de Quiché, el río Motagua tiene un descenso de casi dos mil metros en una distancia aproximada de 190 kilómetros en su curso general hacia el Noreste hasta Gualán. A partir de este punto, su curso es más lento y sus aguas son más profundas, y se ensancha a medida que avanza hacia el mar. La pendiente promedio del cauce principal es de 0,51 %.

La profundidad del río desde Gualán hasta su desembocadura se ha estimado entre 2 y 5 metros y su anchura media en unos 60 metros, que aumentan hasta 200 metros en su salida al mar. Hay que señalar que el asolvamiento ha producido enormes bancos de arena a lo largo de su cauce.⁵

3.5. Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Motagua

Para el presente trabajo de investigación se trabajará con los datos de las estaciones pertenecientes al INSIVUMEH, y que además presentan consistencia en sus registros, las cuales se enlistan a continuación.

⁵ DE LEÓN, R. *Análisis de contaminación de peces en el río Motagua (contaminación de peces y lesiones gastrointestinales y dermatológicas)*. 2003. p. 74.

Tabla I. **Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca**

Estación	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)	Estado
Puerto Barrios	-88,59167	15,737778	2	En operación
San Martín Jilotepeque	-90,79222	14,786944	1800	En operación
Santa Cruz Balanya	-90,91528	14,686667	2080	En operación
Potrero Carrillo	-89,93222	14,760556	1760	En operación
La Suiza Contenta	-90,66111	14,616667	2105	En operación
La Unión	-89,29417	14,966667	1000	En operación
Pasabien	-89,68	15,03	260	En operación
INSIVUMEH	-90,53278	14,586389	1502	En operación

Fuente: elaboración propia.

3.6. Geomorfología, climatología, afluentes y parámetros hidrológicos

A continuación se presenta la información sobre estos aspectos.

3.6.1. Geomorfología

La cuenca del río presenta forma alargada, extendiéndose de oeste a este, siendo la parte este de la cuenca la más irregular, la región central guarda cierta uniformidad en su extensión, teniendo un ancho promedio de 52 kilómetros aproximadamente, también marca la falla del Motagua, es decir, la frontera tectónica entre la placa norteamericana y la placa del Caribe.

Cabe mencionar que la falla del Motagua ha producido algunos de los terremotos más destructivos en Guatemala, como lo fue el ocurrido la madrugada del 4 de febrero de 1976.

La cuenca está delimitada al norte por la Sierra de Chuacús (2 478 msnm), la Sierra de las Minas (2 444 msnm) y las Montañas del Mico (1 267 msnm); y al sur por la montaña Espíritu Santo (496 msnm), en Honduras.

3.6.2. Climatología, aforos y parámetros hidrológicos

Debido al gran tamaño de la cuenca del río Motagua, la misma posee un clima que tiene un amplio rango de variación, con la presencia de microclimas que caracterizan zonas particulares. La temperatura varía a lo largo de la cuenca, registrando datos entre 25 °C y 35 °C para Izabal, mientras que en los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá y Chimaltenango, zona que cuenta con la mayor cantidad de microclimas, las temperaturas promedio oscilan entre los 8 °C y 29 °C.

En el caso de los departamentos de Guatemala, El Progreso y Zacapa, esta variable va desde los 14 °C a los 40 °C. Por último, en Jalapa, Chiquimula y Baja Verapaz, la temperatura promedio puede encontrarse entre los 10 °C a 25 °C.

El régimen de lluvias en la cuenca del Río Motagua es variado, presenta zonas como el altiplano con precipitación media anual de 1 000 a 1 400 mm, zonas relativamente secas como en los llanos de la Fragua (Zacapa), cuyo promedio anual alcanza 400 a 600 mm, en la sierra de las Minas y en la sierra del Gallinero, en Honduras, la precipitación media anual alcanza los 2 000 a 3 000 mm. Existen zonas sumamente húmedas con valores de 4 000 a 4 500 mm en la región de la bahía de Amatique (desembocadura del río Motagua).

La precipitación media anual en la cuenca varía de menos de 1 000 mm a más de 3 000 mm, además la disponibilidad hídrica en dicha cuenca es de aproximadamente 6 545 000 m³ de agua, y posee un caudal de 207,54 m³/seg.

3.7. Climatología

La variabilidad climática de la cuenca del río Motagua está constituida por diez diferentes zonas, las cuales poseen un amplio rango de variación.

Las zonas que constituyen la cuenca del río se enlistan a continuación:

- bh-MB: bosque húmedo Montano Bajo Subtropical
- bh-S(t): bosque húmedo Subtropical (templado)
- bmh-T: bosque muy húmedo Tropical
- bmh-M: bosque muy húmedo Montano Subtropical
- bmh-MB: bosque muy húmedo Montano Bajo Subtropical
- bmh-S(c): bosque muy húmedo Subtropical (cálido)
- bmh-S(f): bosque muy húmedo Subtropical (frío)
- bp-MB: bosque pluvial Montano Bajo Subtropical
- bs-S: bosque seco Subtropical
- me-S: monte espinoso Subtropical

3.8. Geografía

La cuenca del río Motagua está cubierta en buena parte de su territorio por el Valle del Motagua, siendo rodeada por la Sierra Madre, Sierra de las Minas, de Chuacús, de Santa Cruz, del Mico y de la Estrella, Merendón y Omoa en Honduras.

Esta cuenca además colinda al norte con las cuencas de los ríos Dulce y Chixoy, al oeste con la cuenca del río Samalá, al sur con las cuencas de los ríos Nahualate, Madre Vieja, Coyolate, Acome, Achiguate, Maria Linda, Los

Esclavos, Lempa y el lago de Amatitlan; al este con las cuencas de los ríos Chamelecón y Ulúa, ambas localizados en Honduras.

3.9. Geología y suelos

Geológicamente la cuenca del río Motagua se divide en tres grupos:

- Tierras altas sedimentarias: el material en esta región es de rocas metamórficas sin dividir del paleozoico (filitas, esquistos cloróticos y granatíferos, gneises de cuarzo mica, feldespatos, mármol y magmatitas), rocas volcánicas sin dividir del terciario, rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso del cuaternario, formaciones río Dulce (caliza), Lacantún (capas rojas) y desempeño (conglomerados) del terciario superior oligoceno mioceno, carbonatos neocomiano campiano del cretáceo, incluye también áreas de aluvión del cuaternario en la llanura costera.
- Tierras altas cristalinas: geológicamente esta región se encuentra formada por rocas metamórficas sin dividir, filitas, esquistos cloróticos y granatíferos, gneises de cuarzo, mica, feldespatos, mármol y magmatitas con inclusiones de aluviones del cuaternario, así como rocas plutónicas sin dividir, incluyendo granitos y dioritas de edad pérmica y terciaria, incluye también tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos, rocas metamórficas sin dividir del paleozoico, carbonatos neocomiano campiano ultrabásicos de edad desconocida.
- Depresión del Motagua: esta región del río Motagua posee un material geológico formado principalmente por aluvión del cuaternario, rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso del cuaternario y

principalmente continentales del terciario superior oligoceno plioceno. Incluye también material continental pero predominantemente las formaciones Cayo, Armas y Caribe del terciario oligoceno plioceno

Además la cuenca presenta cuatro diferentes tipos de suelos, enlistados a continuación:

- Suelos desarrollados sobre ceniza volcánica a elevaciones medianas
- Suelos desarrollados sobre esquistos a elevaciones medianas
- Suelos desarrollados sobre ceniza volcánica a elevaciones altas
- Suelos desarrollados sobre depósitos marinos a elevaciones bajas

4. APLICACIÓN Y ANÁLISIS EN LA ZONA DE ESTUDIO

4.1. Metodología de la información

El análisis de la variabilidad de los recursos hídricos de la cuenca del río Motagua se efectuó a partir de los datos pertenecientes a las estaciones que el INSIVUMEH posee, tomando como línea de trabajo el periodo de observaciones comprendido entre el año 1975 y el año 2015, esto con el fin de analizar el comportamiento y la tendencia de la climatología de la cuenca.

Posteriormente los datos obtenidos se sometieron a controles de calidad en donde se verificó la consistencia y confiabilidad mediante el método de la desviación estándar, el cual es una medida de centralización para variables de razón y de intervalos, para poder, finalmente, a través del software RClimDex, calcular los índices de variabilidad y tendencia para el periodo considerado, cabe mencionar que estos índices pondrán de manifiesto la tendencia general de la variabilidad de los recursos hídricos de la cuenca.

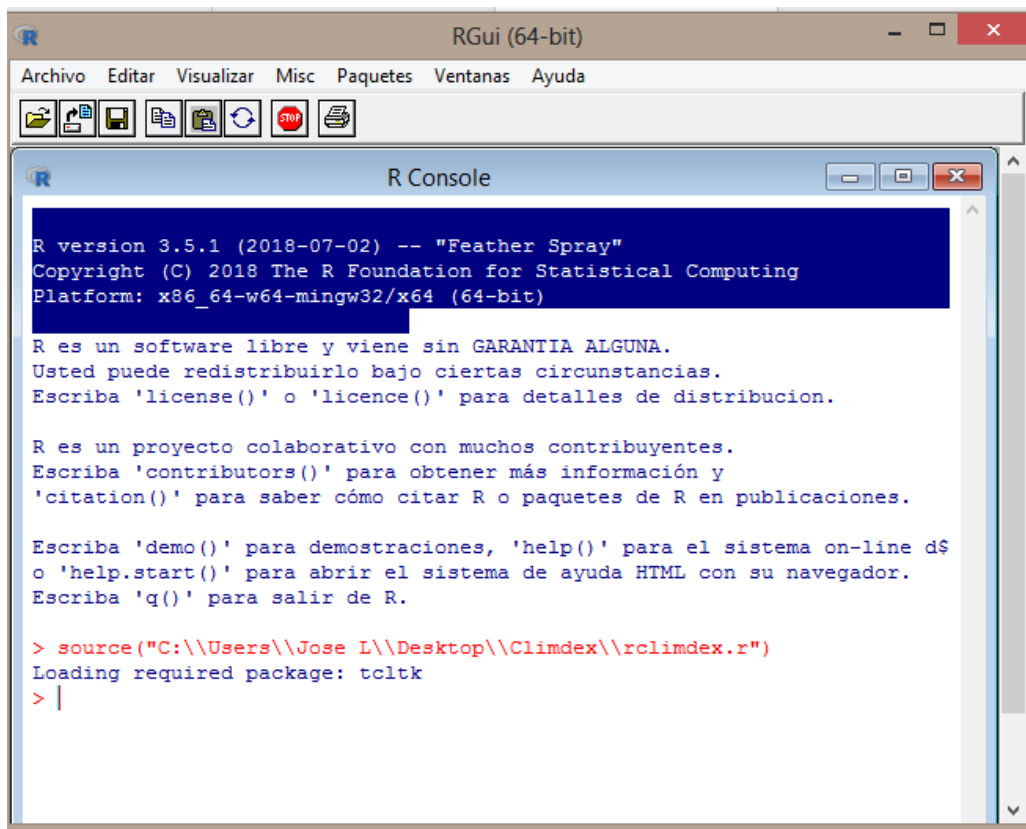
4.2. Software RClimDex

“Para la determinación de los indicadores o índices del cambio climático se utilizó el software RclimDex, basado en Microsoft Excel, inicialmente este programa fue desarrollado como ClimDex. El paquete computacional es de fácil utilización y permite el cálculo de numerosos índices de extremos climáticos.”⁶

⁶ ETCCDI. *Software gratuito RClimDex*. <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>.

Fue desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Centre (NCDC) del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA por sus siglas en inglés).

Figura 9. **Plataforma inicial RClimDex**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Posteriormente se implementó el programa en la plataforma R y surgió el paquete RClimDex. Este programa evalúa y calcula 27 índices básicos recomendados por el equipo de expertos de CCI/CLIVAR para Climate Change Detection Monitoring and Índices (ETCCDMI), así como otros índices de temperatura y precipitación con límites definidos por el usuario.

4.2.1. Control de calidad

Los datos de las estaciones que se utilizaron en el presente trabajo de investigación inicialmente se sometieron a un control de calidad previo (QC) a través del módulo de calidad integrado en el software RClimDex, con el cual se buscó identificar los valores extremos de precipitación mediante la desviación estándar. Como criterio para el control de calidad de los datos, todos los valores extremos superiores a $\pm 3\sigma$ de la media u *outliers*, fueron evaluados y analizados de manera detallada, para posteriormente ingresarlos nuevamente al control de calidad del software RClimDex.

Se debe procurar que la información utilizada para analizar la variabilidad de los recursos hídricos cuente con series de datos lo más confiables posible, ya que la mayoría de las series largas suelen estar afectadas por factores no climáticos, dificultando la identificación de las variaciones del clima a lo largo del tiempo. Para ello se debe ser minucioso con el fin de poder detectar los posibles saltos o heterogeneidades que presente la serie, así como la posible causa de los mismos. Se describe a continuación tanto el control de calidad interno de RClimDex como el control efectuado por el usuario.

4.2.1.1. El control de calidad (QC) interno de RClimDex

El software desarrolla el siguiente procedimiento:

- Reemplaza todos los datos faltantes (actualmente codificados como -99,9) en un formato interno que reconoce RClimDex (ejemplo: NA, no disponible).

- Reemplaza todos los valores no razonables por NA. Estos valores incluyen:

- Cantidades de precipitación diarias menores que cero
- Temperatura máxima diaria menor que temperatura mínima diaria

4.2.1.2. Control de calidad realizado por el usuario y control de homogeneidad

- Se identifican valores extremos (*outliers*) en temperaturas diarias máximas y mínimas. Los valores extremos son valores diarios que se encuentran fuera de un límite de la desviación estándar, establecidos por el usuario.
- Se escogen los valores tanto para la media como para las desviaciones típicas a fin de identificar inconsistencia en los datos de temperatura.
- Finalmente el usuario define si deja, modifica o elimina el dato que presente inconsistencia.

A través de los controles anteriormente descritos, es posible identificar los valores extremos (*outliers*), en temperatura, precipitación y caudales.

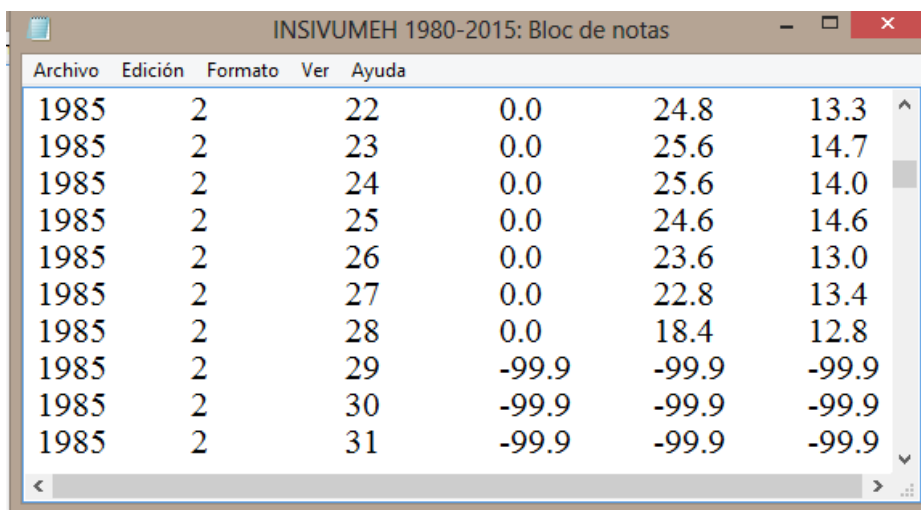
4.2.2. Procesamiento de la información y generación de índices

Los datos de precipitación, temperatura máxima y mínima de las estaciones seleccionadas, se sistematizaron a manera que cumplieran ciertas

características y se ajustaran al formato de entrada de los archivos utilizado por el software RClimDex, dicho formato se describe a continuación:

- La primera columna debe ser el año de registro.
- La segunda columna corresponde al mes.
- La tercera columna indica el día.
- La cuarta columna es el dato de precipitación, con un decimal.
- La quinta y sexta columnas corresponden a los datos de temperatura máxima y mínima respectivamente, con un decimal.
- Los datos vacíos deben ser llenados con el número -99,9, el cual es un valor indiferente para el programa.
- El archivo de 6 columnas se debe grabar en formato de texto, es decir con extensión .TXT indicada como: Text (tab delimited).
- Para el caso de los caudales, los datos de la primera a la tercera columna son los mismos (año, mes, día) y en la cuarta columna se cambia el valor de precipitación por el valor de caudal diario. La quinta y sexta columna se rellenan con el valor de -99,9, para con ello cumplir con el formato de archivo requerido por el software.

Figura 10. **Formato para ingreso de datos**



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda		
1985	2		22	0.0	24.8	13.3
1985	2		23	0.0	25.6	14.7
1985	2		24	0.0	25.6	14.0
1985	2		25	0.0	24.6	14.6
1985	2		26	0.0	23.6	13.0
1985	2		27	0.0	22.8	13.4
1985	2		28	0.0	18.4	12.8
1985	2		29	-99.9	-99.9	-99.9
1985	2		30	-99.9	-99.9	-99.9
1985	2		31	-99.9	-99.9	-99.9

Fuente: elaboración propia, empleando software Word Office .txt.

Las columnas se ordenan de izquierda a derecha en la secuencia: año, mes, día, Prpc, Tmax y Tmin; la precipitación se ingresa en milímetros (mm), el caudal en metros cúbicos sobre segundo (m³/s) y la temperatura en grados Celsius (°C).

4.2.3. Datos

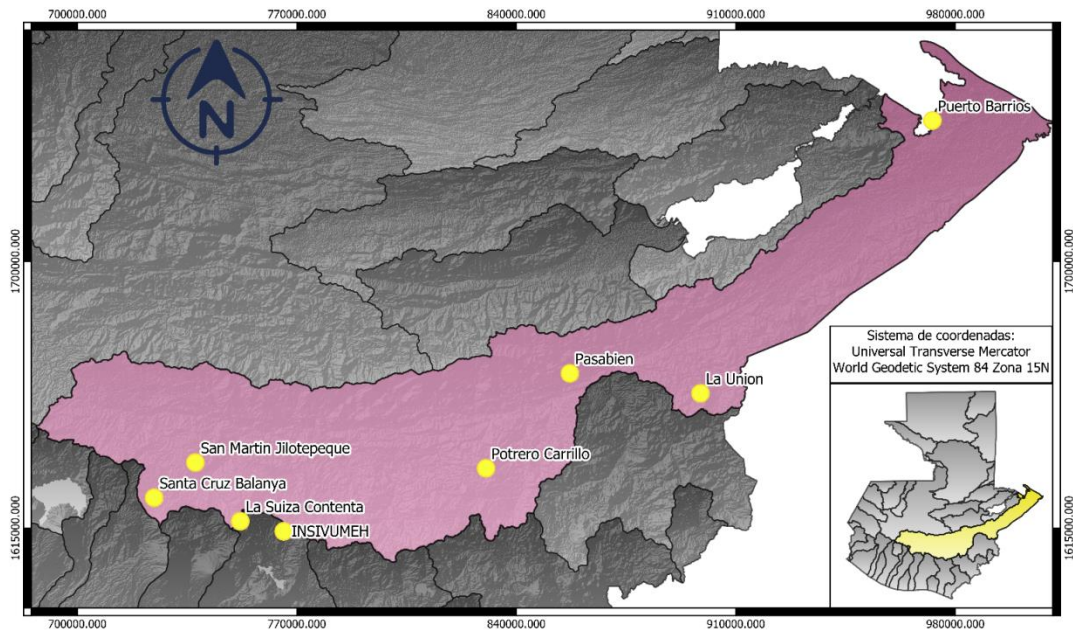
Para poder alcanzar los objetivos de este trabajo, es necesario contar con una base de datos diaria, consistente, homogénea y lo más extensa posible en el tiempo, por lo que se estudiaron los datos de ocho estaciones pertenecientes al INSIVUMEH, verificando que las mismas presentaran calidad en sus datos y a su vez series de tiempo con el 80 % o más de los datos para el periodo de estudio, se enlistan a continuación las estaciones analizadas, su ubicación y el periodo de estudio.

Tabla II. **Estaciones meteorológicas analizadas**

Estación	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)	Primer año	Ultimo año
Puerto Barrios	-88,59167	15,737778	2	1975	2015
San Martín Jilotepeque	-90,79222	14,786944	1 800	1975	2015
Santa Cruz Balanya	-90,91528	14,686667	2 080	1975	2015
Potrero Carrillo	-89,93222	14,760556	1 760	1980	2015
La Suiza Contenta	-90,66111	14,616667	2 105	1976	2010
La Unión	-89,29417	14,966667	1 000	1980	2015
Pasabien	-89,68	15,03	260	1975	2015
INSIVUMEH	-90,53278	14,586389	1 502	1980	2015

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS y modelo de elevación digital con datos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

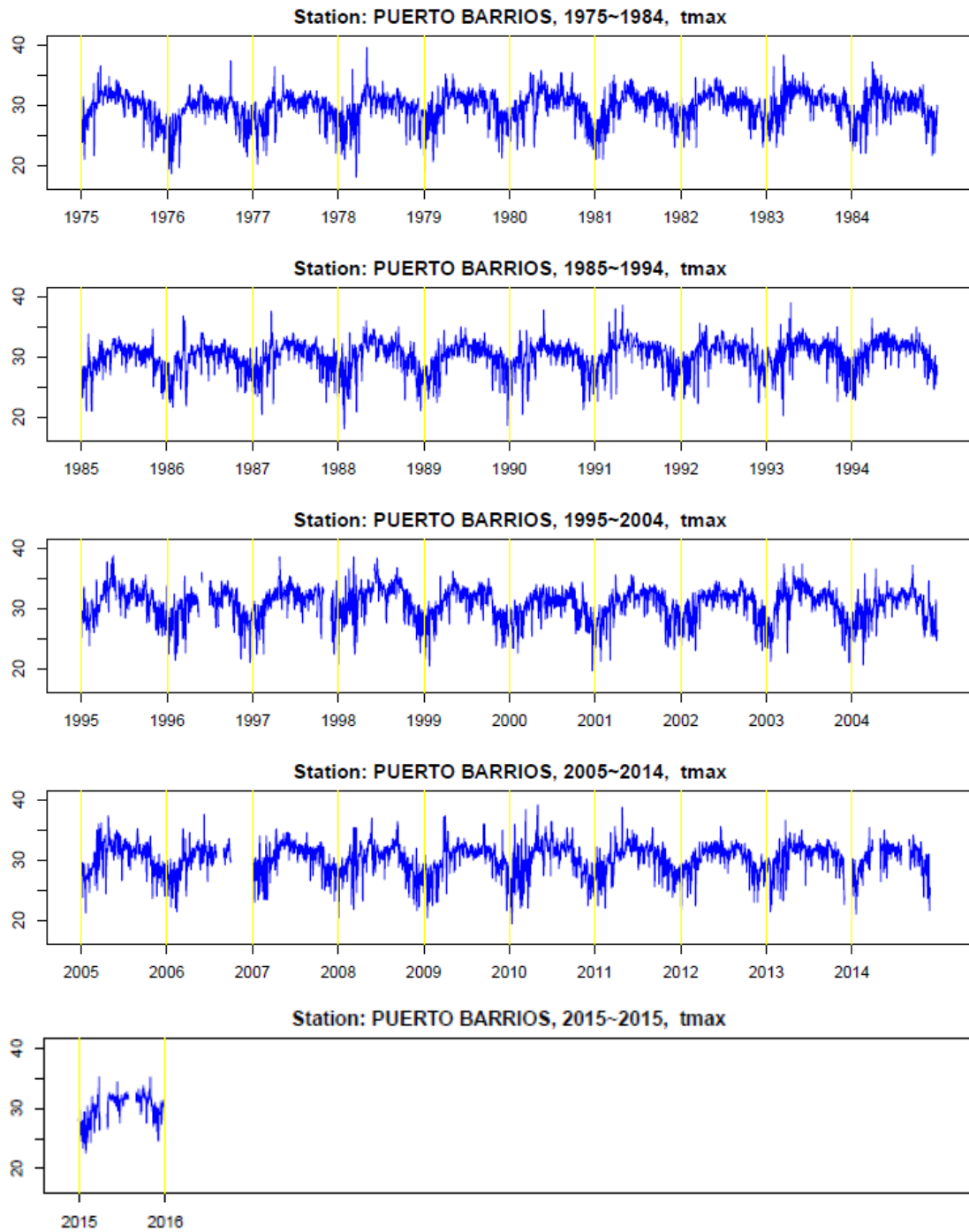
4.2.4. Rangos y saltos de tiempo en datos

Mediante el software RClimDex no solo es posible generar tablas de datos, sino que además permite visualizar series de datos para las variables que se analizaron, tales como la precipitación y temperatura, detallada en rangos de 10 años, en dichas series se puede apreciar también espacios vacíos que no pudieron ser completados en su momento, ya sea por algún evento climático que dañara el equipo, desactivación temporal de la estación o desperfectos de la misma.

Posteriormente, haciendo uso del software RClimDex, se evaluaron los datos de temperatura, precipitación y caudal para cada una de las estaciones, esto luego de haber pasado por el control de calidad de dicho software y además corrigiendo mediante promedio aritmético o con base en datos cercanos los valores que se encontraban fuera de las desviaciones estándar establecidas por el software. Cabe mencionar que cuando existían datos incoherentes estos fueron tomados como datos faltantes.

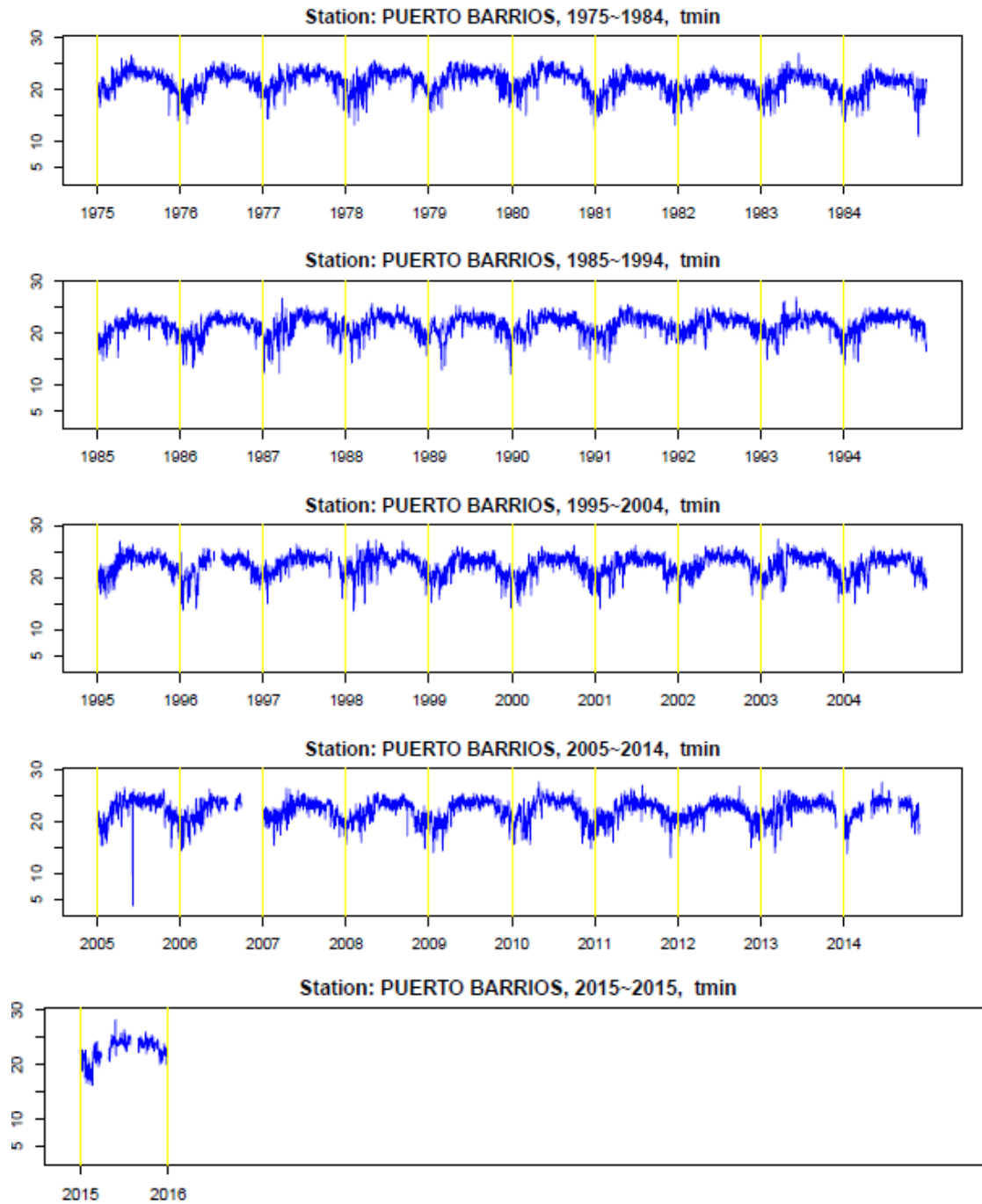
A fin de ejemplificar la manera en que el software muestra las series de datos, se seleccionaron las estaciones de Puerto Barrios y San Martín Jilotepeque, para las cuales se obtuvieron las series de precipitación y temperatura respectivamente, a fin de observar la manera en que actúan los datos a través del tiempo.

Figura 12. Estación Puerto Barrios, series de temperatura máxima (t_{max})



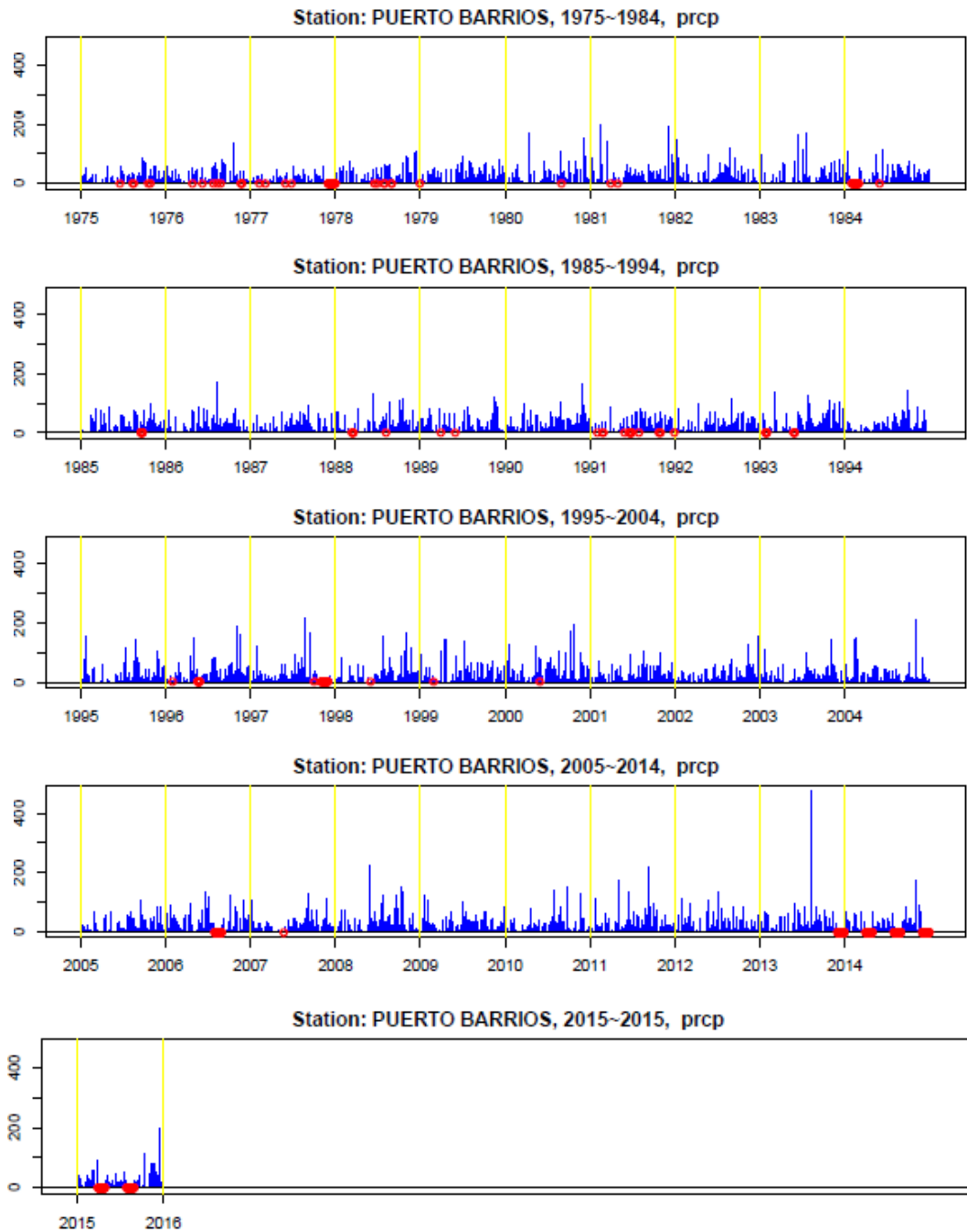
Fuente: elaboración propia, empleando software RClmDex.

Figura 13. Estación Puerto Barrios, series de temperatura mínima (t_{min})



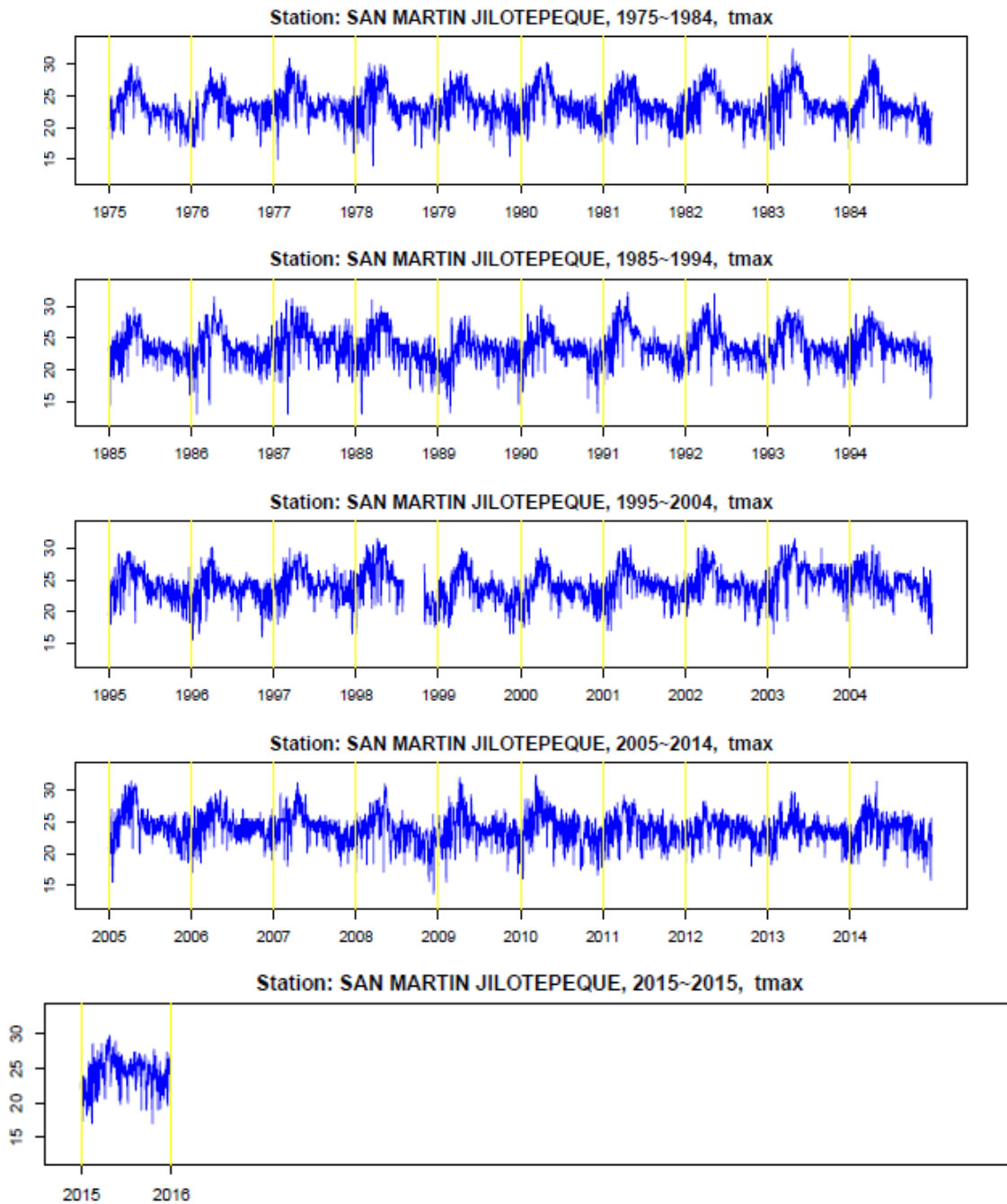
Fuente: elaboración propia, empleando software RCLimDex.

Figura 14. Estación Puerto Barrios, series de precipitación (prcp)



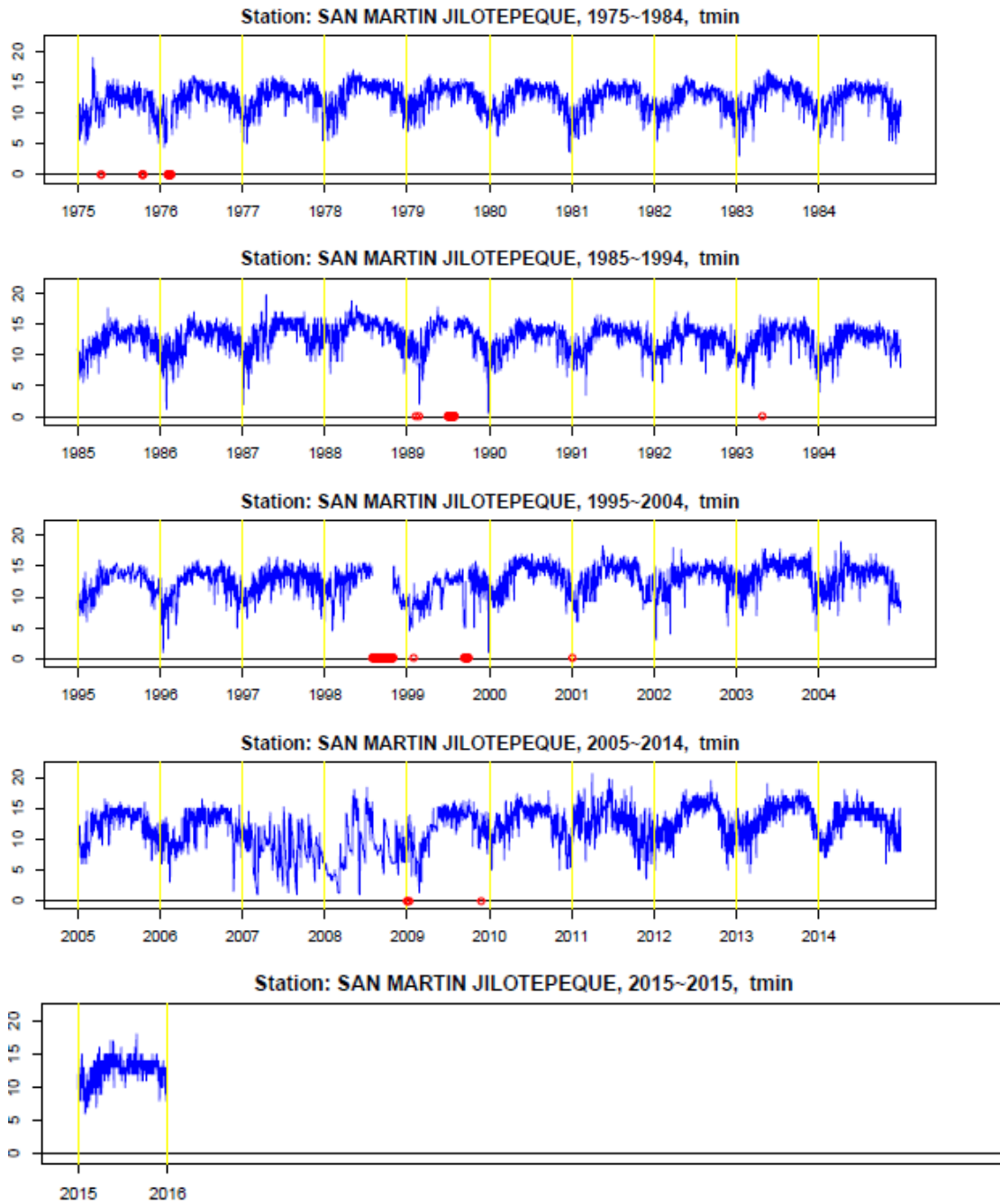
Fuente: elaboración propia, empleando software RCLimDex.

Figura 15. Estación San Martín Jilotepeque, series de temperatura máxima (t_{max})



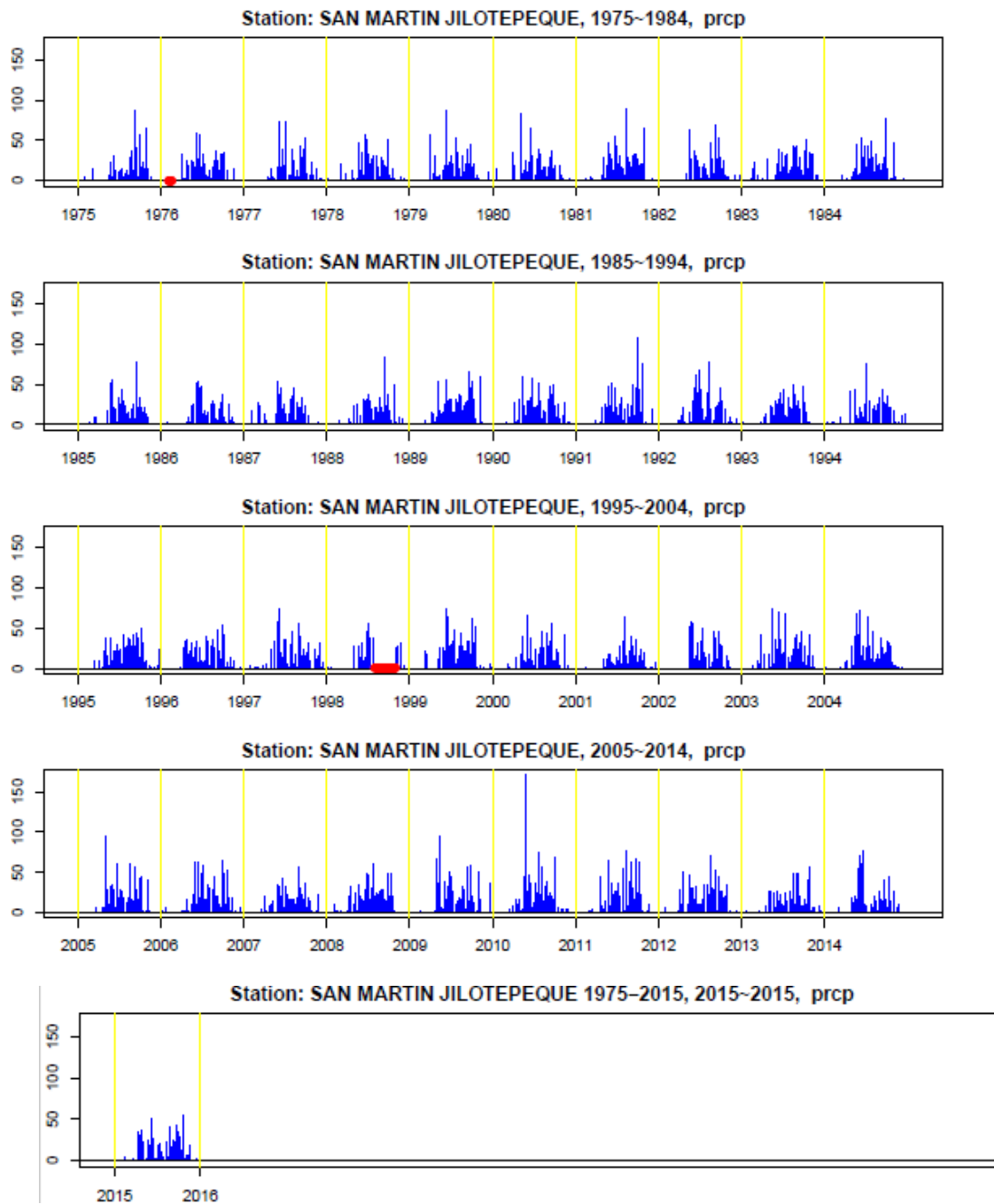
Fuente: elaboración propia, empleando software RCLimDex.

Figura 16. **Estación San Martín Jilotepeque, series de temperatura mínima (t_{min})**



Fuente: elaboración propia, empleando software RCLimDex.

Figura 17. Estación San Martín Jilotepeque, series de precipitación (prcp)



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

En las figuras anteriores, tanto para la estación de Puerto Barrios como la de San Martín Jilotepeque, se puede ver la manera en que varía la temperatura y la precipitación a lo largo del tiempo de estudio, siendo notorio además que existen espacios vacíos, representados con una línea roja o círculos, en la temperatura y en la precipitación, lo cual indica que no existe suficiente cantidad de datos para ese periodo de tiempo, ya sea por desperfectos de la estación o desactivación temporal de la misma.

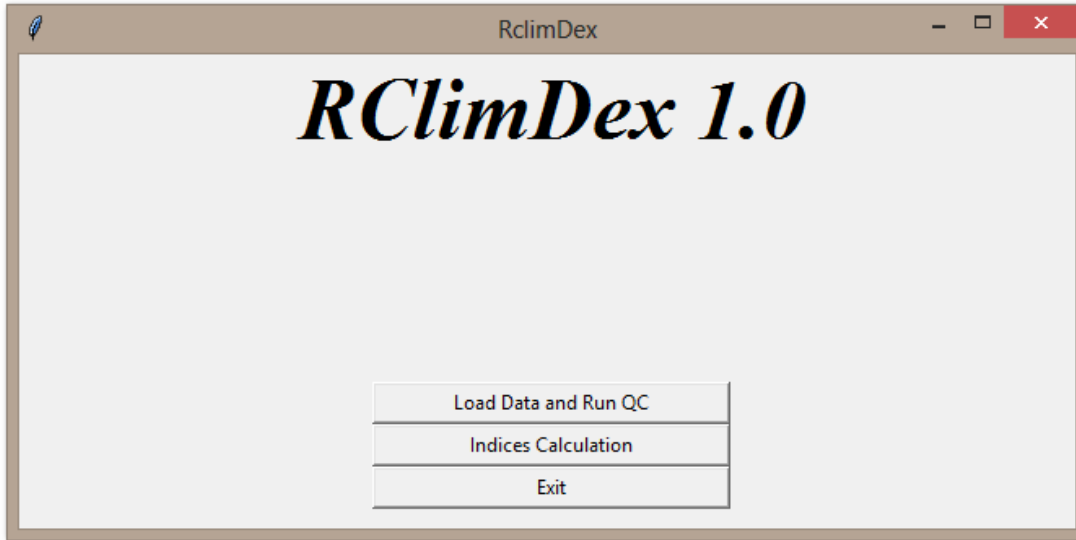
En los datos de precipitación de la estación San Martín Jilotepeque, en el periodo de 1975 al 2015, es de notar que es aproximadamente en el segundo y tercer trimestre de cada año cuando se generan las mayores precipitaciones, mientras que para la estación Puerto Barrios esto ocurre en el tercer trimestre de cada año.

4.3. Generación y gráfico de índices

Luego de haber llevado a cabo el procedimiento de control de calidad, el programa RClimDex genera los gráficos y tablas necesarias para cada índice requerido por el usuario, esto con el fin de visualizar las tendencias para cada una de las variables que se analizaron.

Para poder calcular los índices de cambio climático se ejecuta el programa RClimDex, cargando el archivo de texto que contiene los datos de precipitación o caudal para cada estación meteorológica, cumpliendo con el formato y estructura descrita anteriormente, luego se selecciona la opción Índices Calculation en el menú, como se muestra a continuación.

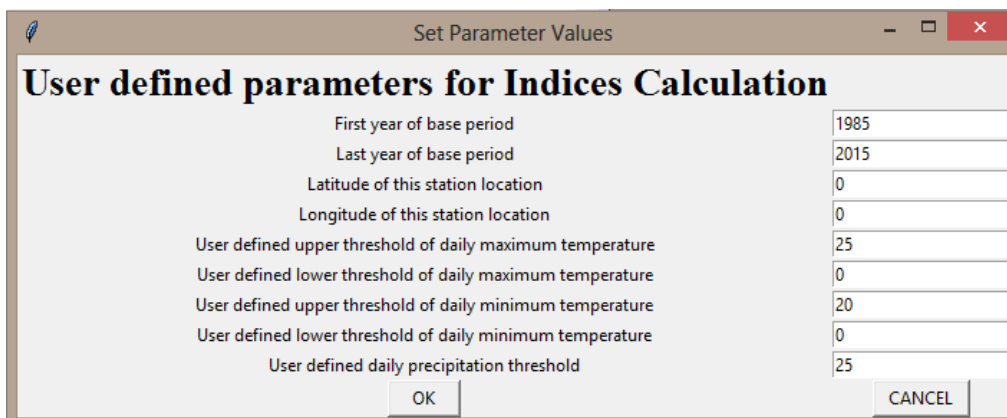
Figura 18. **Ventana inicial de software RClimDex**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

El usuario debe completar los datos o parámetros solicitados en el formulario inicial del software RclimDex y continuar con el proceso.

Figura 19. **Formulario para iniciar cálculo de índices**



Parameter	Value
First year of base period	1985
Last year of base period	2015
Latitude of this station location	0
Longitude of this station location	0
User defined upper threshold of daily maximum temperature	25
User defined lower threshold of daily maximum temperature	0
User defined upper threshold of daily minimum temperature	20
User defined lower threshold of daily minimum temperature	0
User defined daily precipitation threshold	25

Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Completados los datos en el formulario anterior, RClimDex muestra una ventana que permite seleccionar los índices que se desean calcular, para posteriormente obtener las gráficas e índices que permitan efectuar el análisis de tendencias en las variables de interés.

A continuación se muestra la ventana con los índices que trabaja dicho software:

Figura 20. **Ventana de índices a analizar por software RClimDex**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Los índices analizados para cumplir con los objetivos de este trabajo de graduación fueron los siguientes:

Tabla III. **Listado de índices analizados**

Indicador (Unidad)	Detalle	Agrupación
CDD (Días)	Mayor número de días secos consecutivos en un año	Asociados al comportamiento de la precipitación y de eventos extremos de lluvia
CWD (Días)	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año	
PRCTOT (mm)	Precipitación total al año	
R10mm (Días)	Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm	
R20mm (Días)	Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm	
R95P (mm)	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos	
TR20 (Días)	Días al año cuando la temperatura mínima diaria es mayor a 20 °C	Asociados al comportamiento de la temperatura media diaria
SU25 (Días)	Días al año con temperatura máxima diaria mayor a 25 °C	

Fuente: elaboración propia.

4.4. Gráficas de índices

Los resultados para cada índice analizado fueron almacenados en un directorio con archivos en formato Microsoft Excel y en formato Joint Photographic Experts Group (JPG).

Para fines de visualización el software RClimDex proporciona gráficas de series anuales, mostrando en el eje horizontal series de tiempo detallado en rangos de 10 años y en el eje vertical el valor correspondiente para cada índice

analizado, junto con las tendencias calculadas mediante regresión lineal de mínimos cuadrados (línea sólida) y regresión lineal con ponderamientos locales (línea punteada).

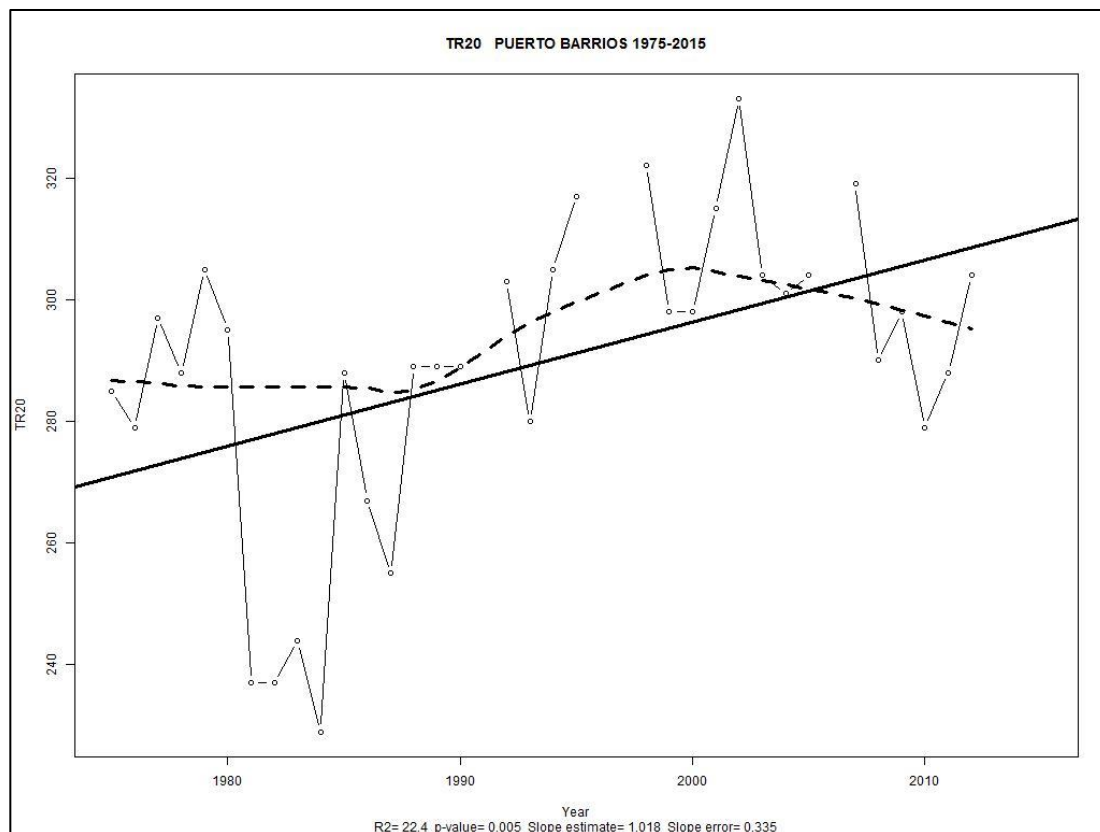
Cada gráfica en su parte inferior muestra un valor denominado *p-value*, el cual indica si la serie es estadísticamente significativa ($p\text{-value} < 0,05$) o no, además se presenta la tendencia estimada (*slope estimate*), que es el dato que interesa en este trabajo de graduación, ya que el mismo define el valor de cambio del indicador y se utilizará para conocer la manera en que se han suscitado las variaciones en los índices de precipitación, temperatura y caudal respecto al tiempo.

A manera de ejemplificar y conocer cómo se manifiestan las variaciones de los índices en estudio, se muestran a continuación las gráficas obtenidas para las estaciones de Puerto Barrios y San Martín Jilotepeque.

4.4.1. Gráficas de índices para la estación Puerto Barrios

Se tomaron en cuenta las siguientes gráficas:

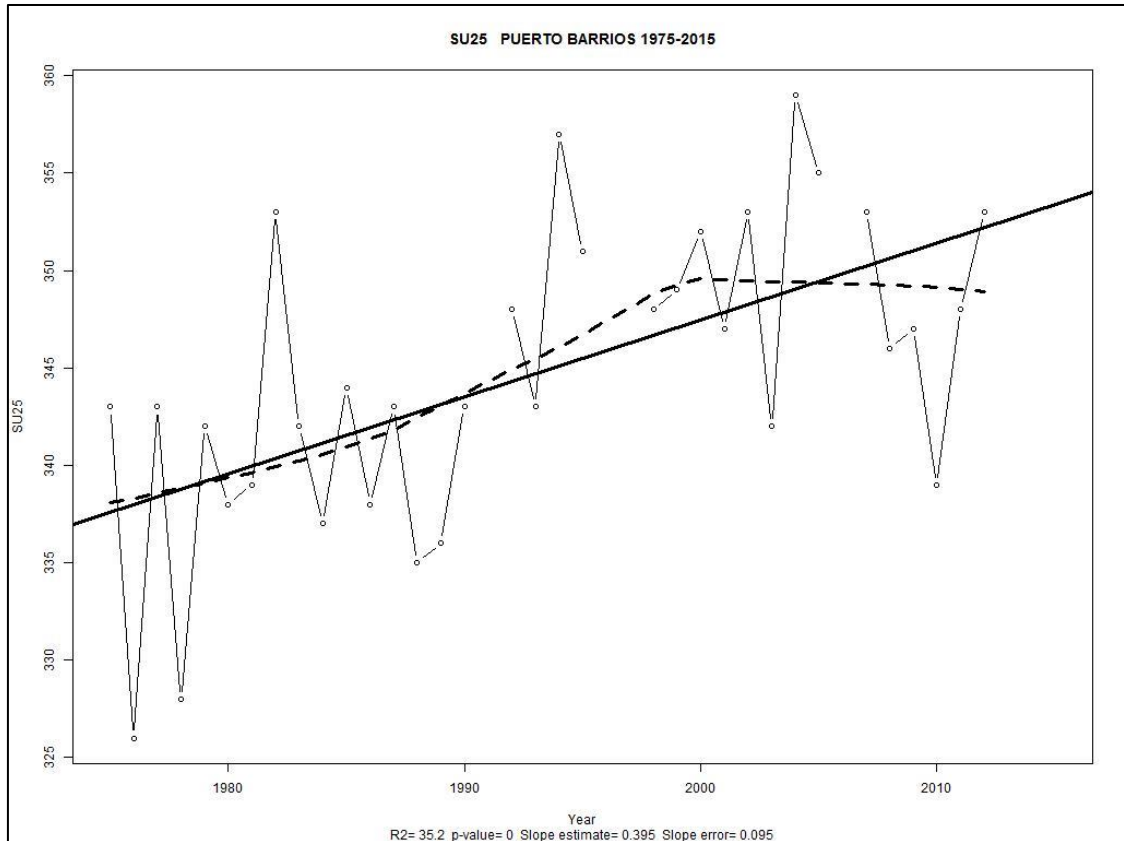
Figura 21. **Días al año cuando la temperatura mínima diaria es mayor a 20 °C (TR20)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 1,018.

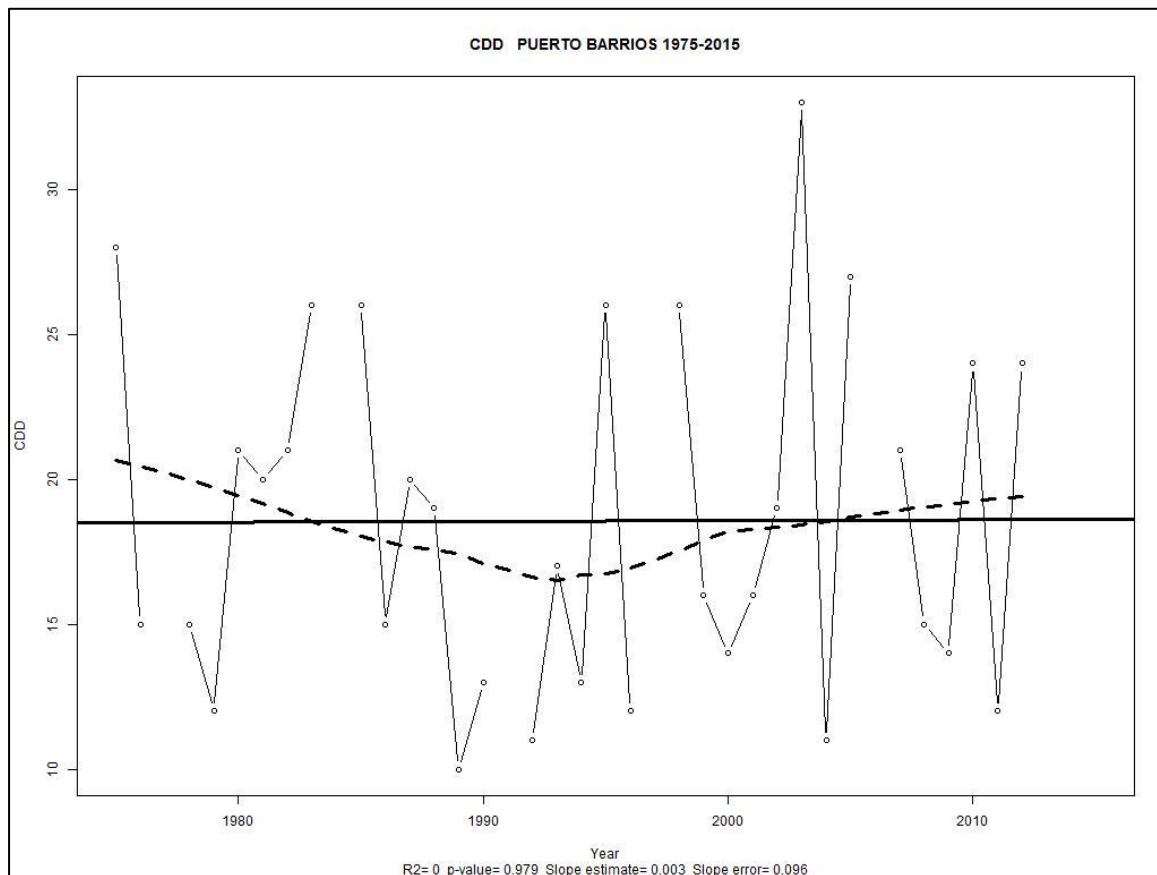
Figura 22. **Días al año cuando la temperatura máxima diaria es mayor a 25 °C (SU25)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClmDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 0,395.

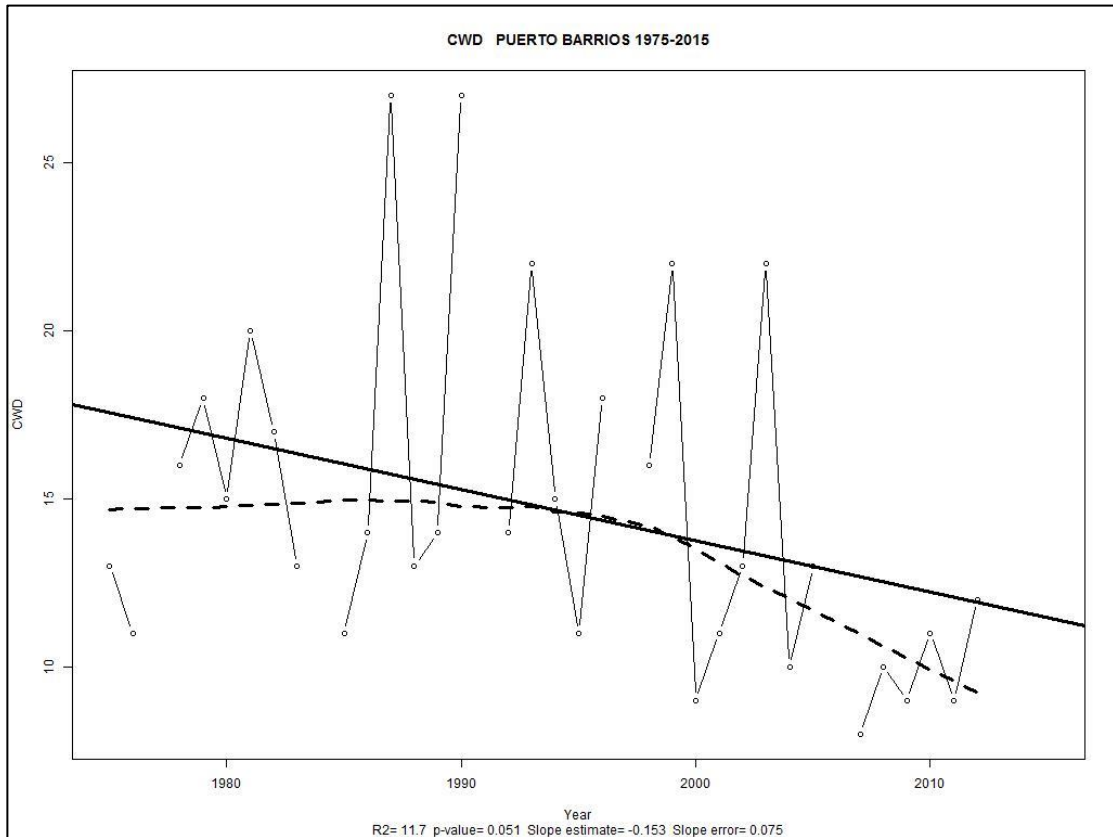
Figura 23. Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)



Fuente: elaboración propia, empleando software RClmDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 0,003.

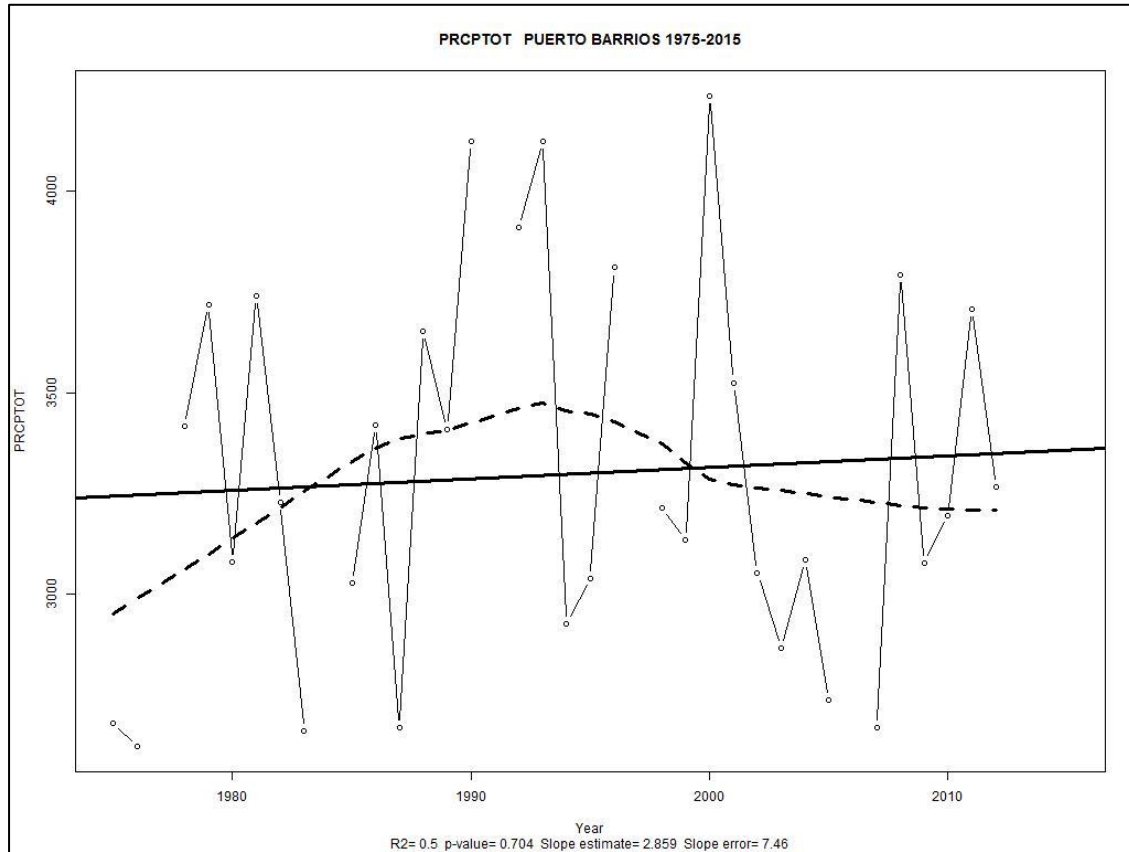
Figura 24. **Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RCLimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = - 0,153.

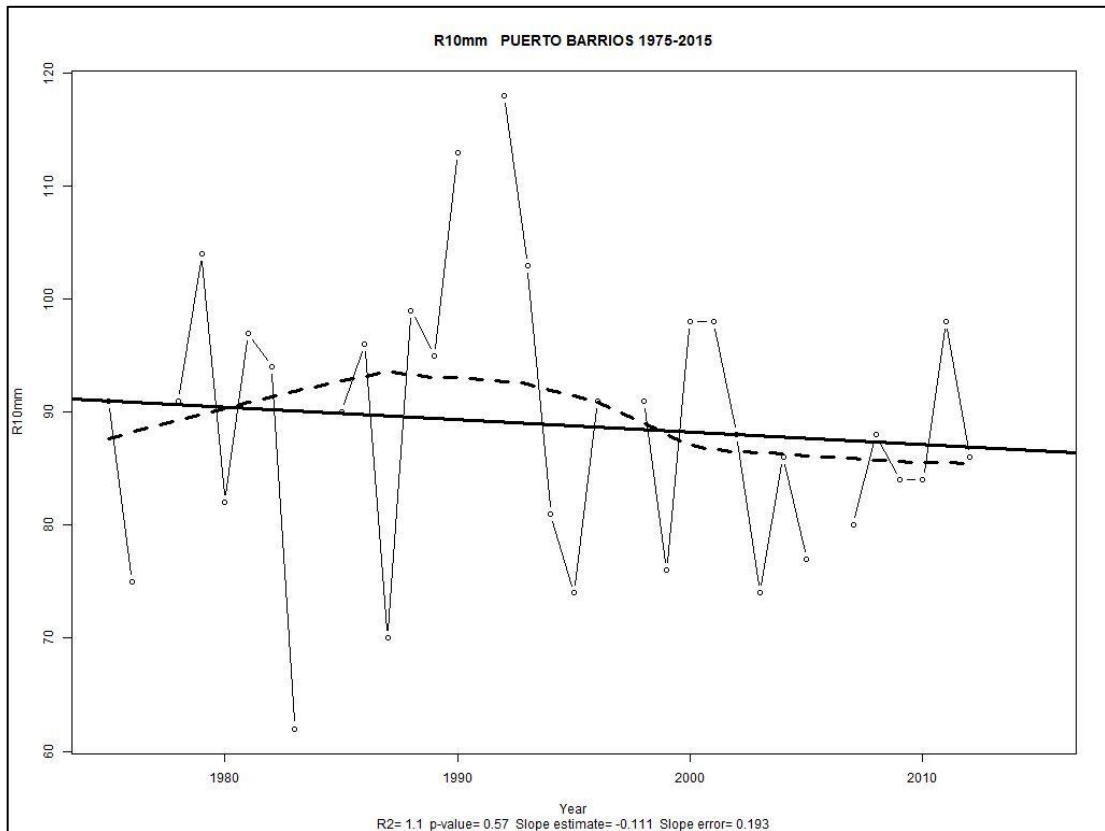
Figura 25. Precipitación total al año (PRCPTOT)



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 2,859.

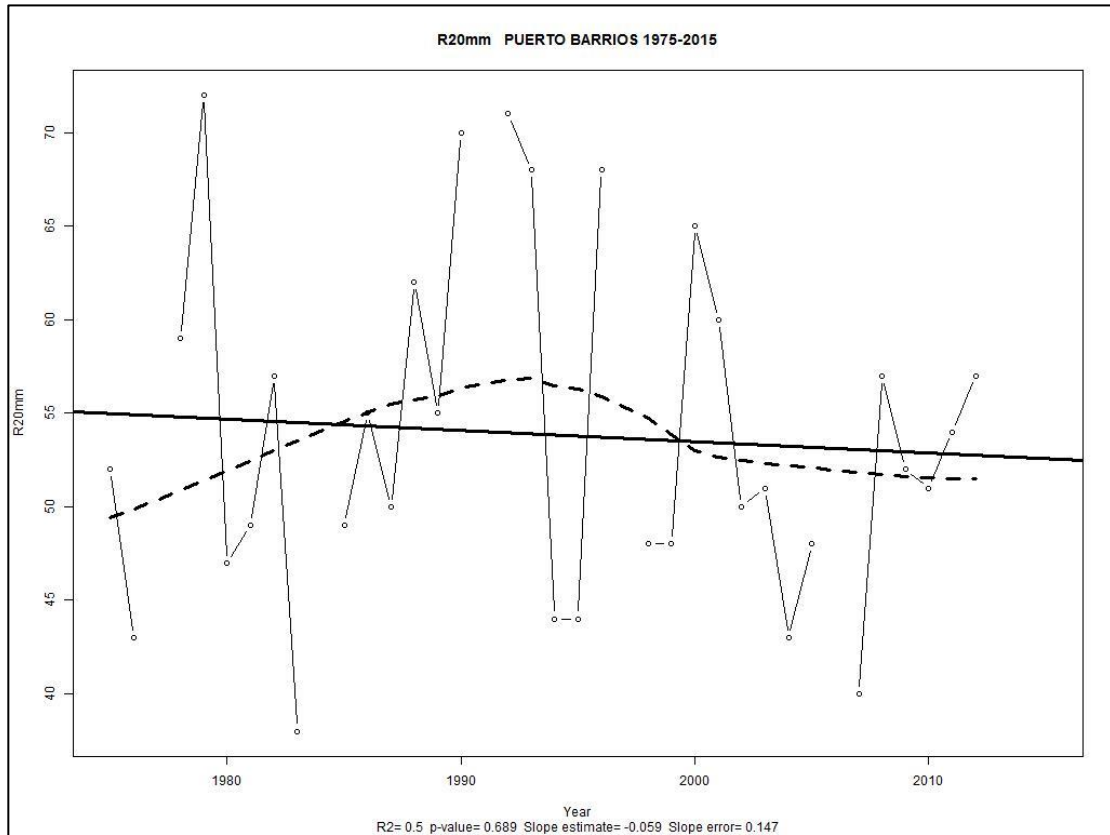
Figura 26. **Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm (R10mm)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClmDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = $-0,111$.

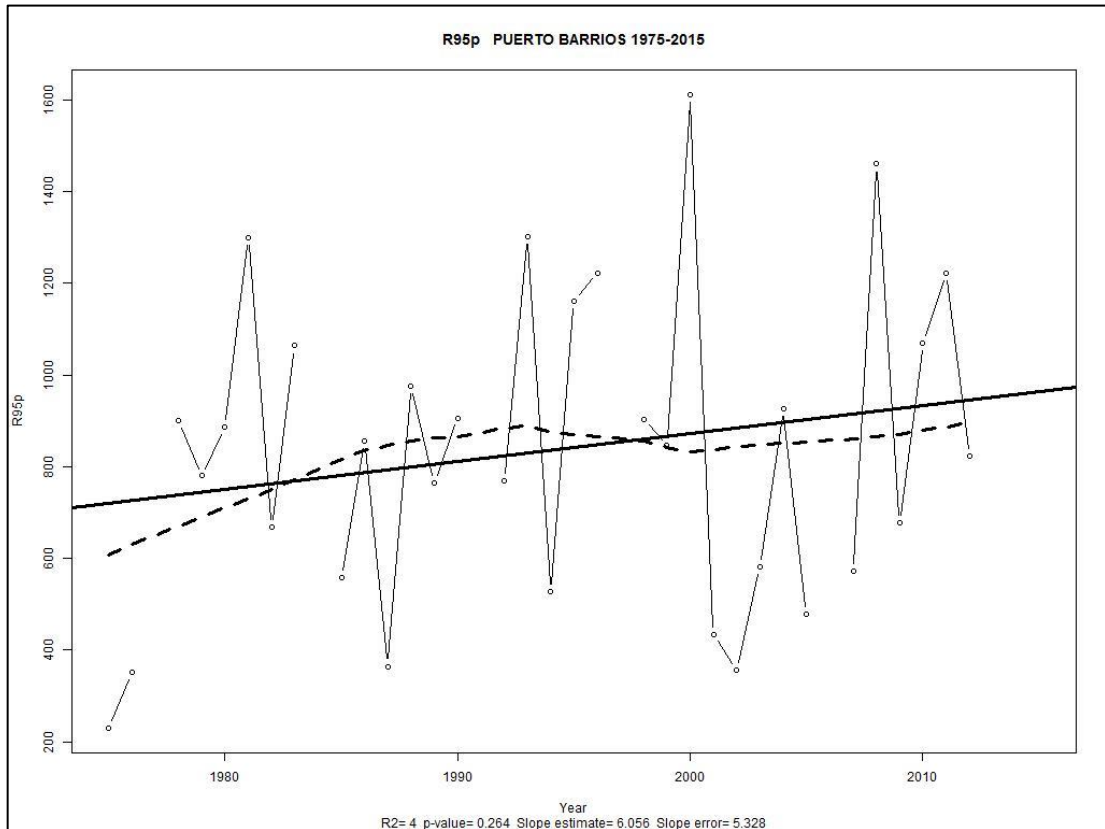
Figura 27. **Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm (R20mm)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = - 0,059.

Figura 28. **Número de días en un año, con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)**



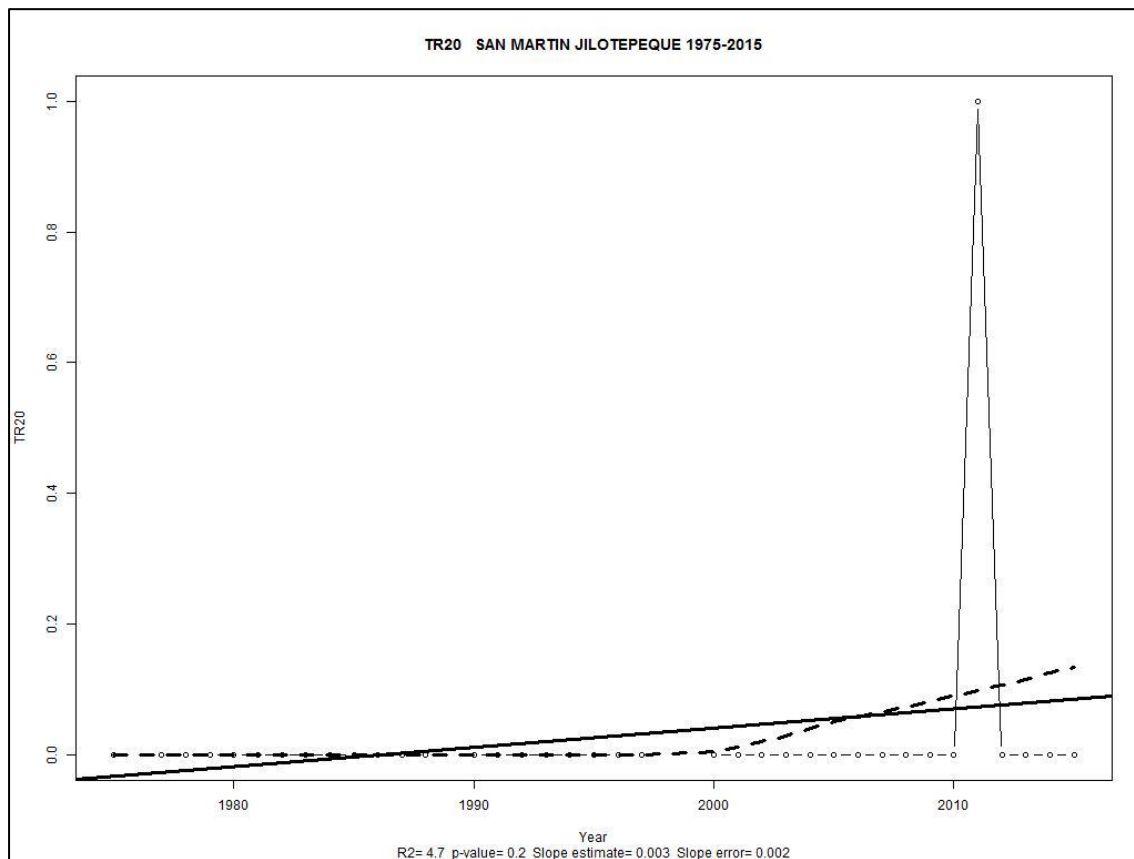
Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 6,056.

4.4.2. Gráficas de índices para la estación San Martín Jilotepeque

A continuación, se presentan las Gráficas de índices para la estación San Martín Jilotepeque.

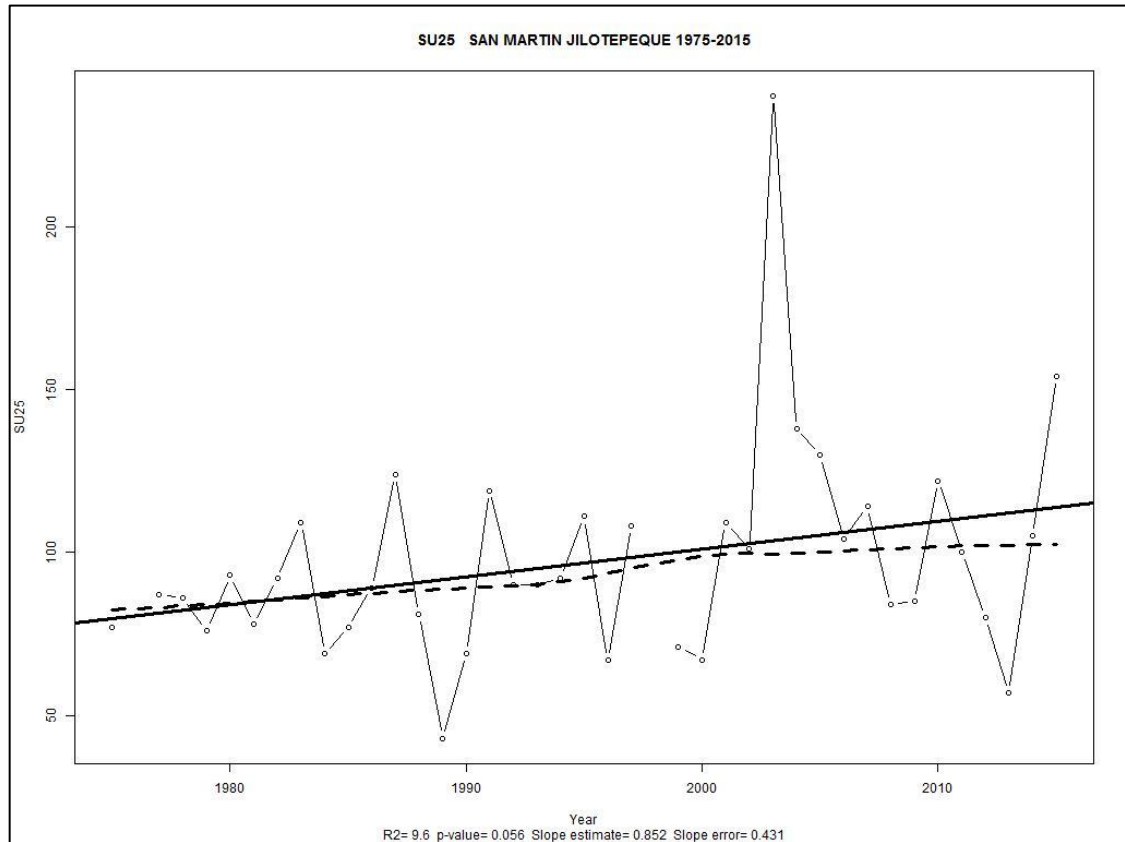
Figura 29. **Días al año cuando la temperatura mínima diaria es mayor a 20°C (TR20)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 0,003.

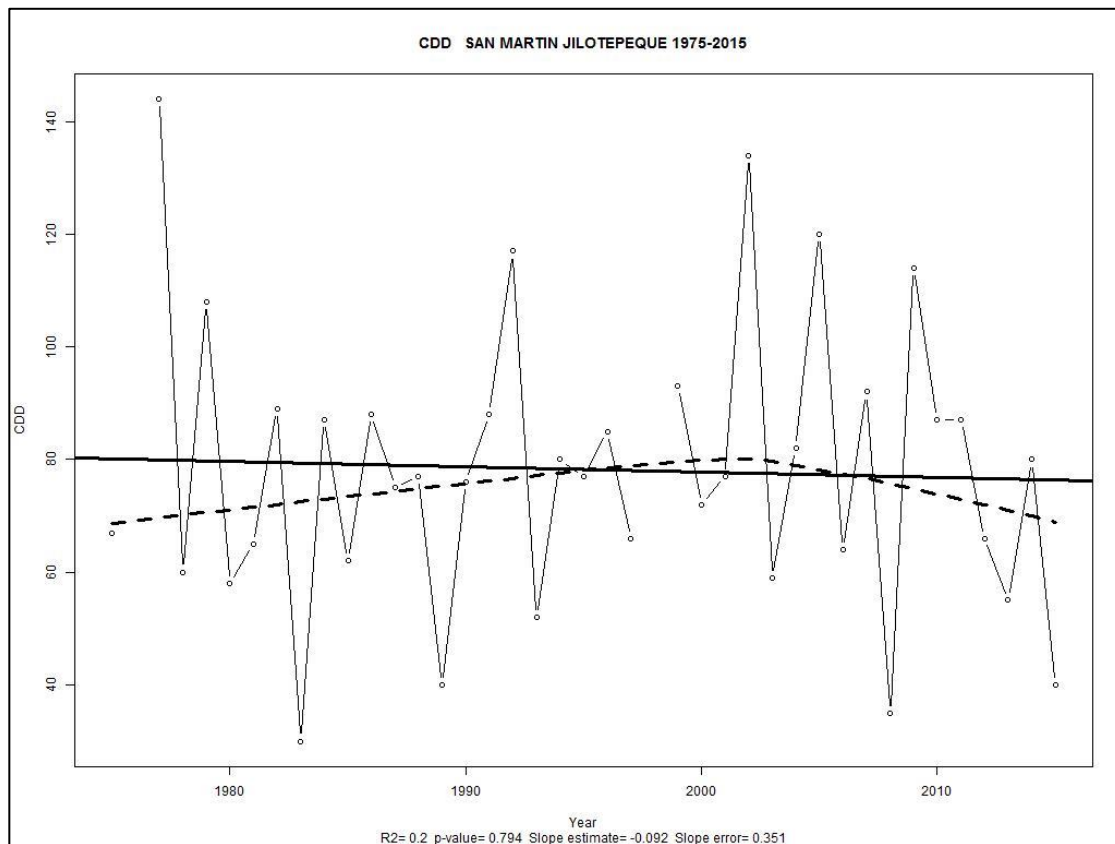
Figura 30. **Días al año cuando la temperatura máxima diaria es mayor a 25 °C (SU25)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 0,852.

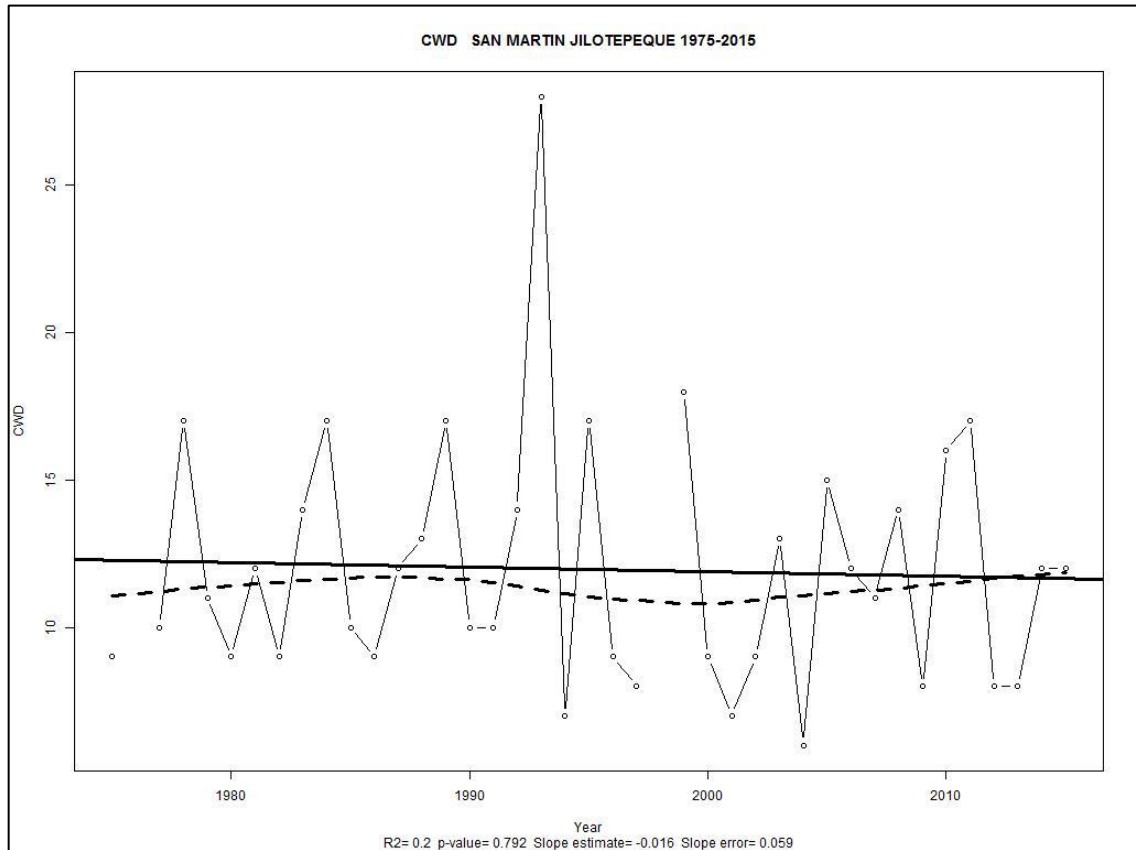
Figura 31. Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)



Fuente: elaboración propia, empleando software RCLimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = - 0,092.

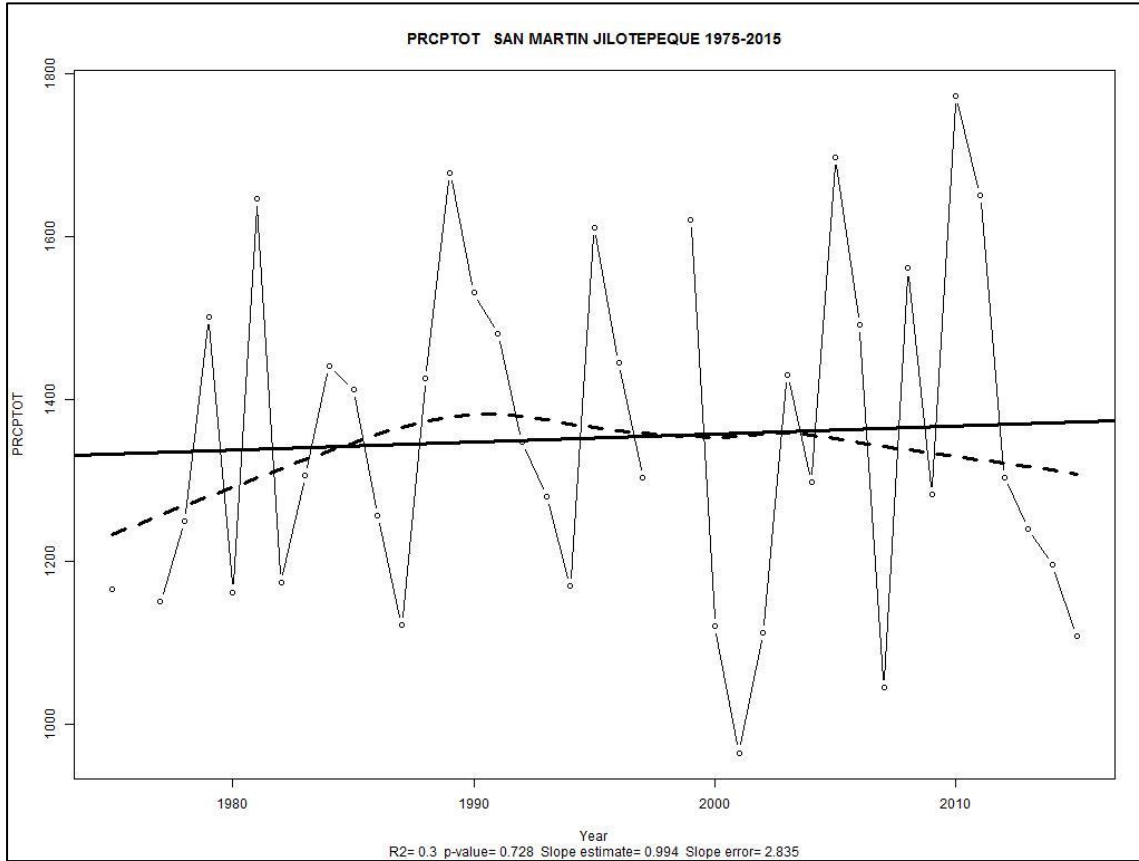
Figura 32. **Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = $-0,016$.

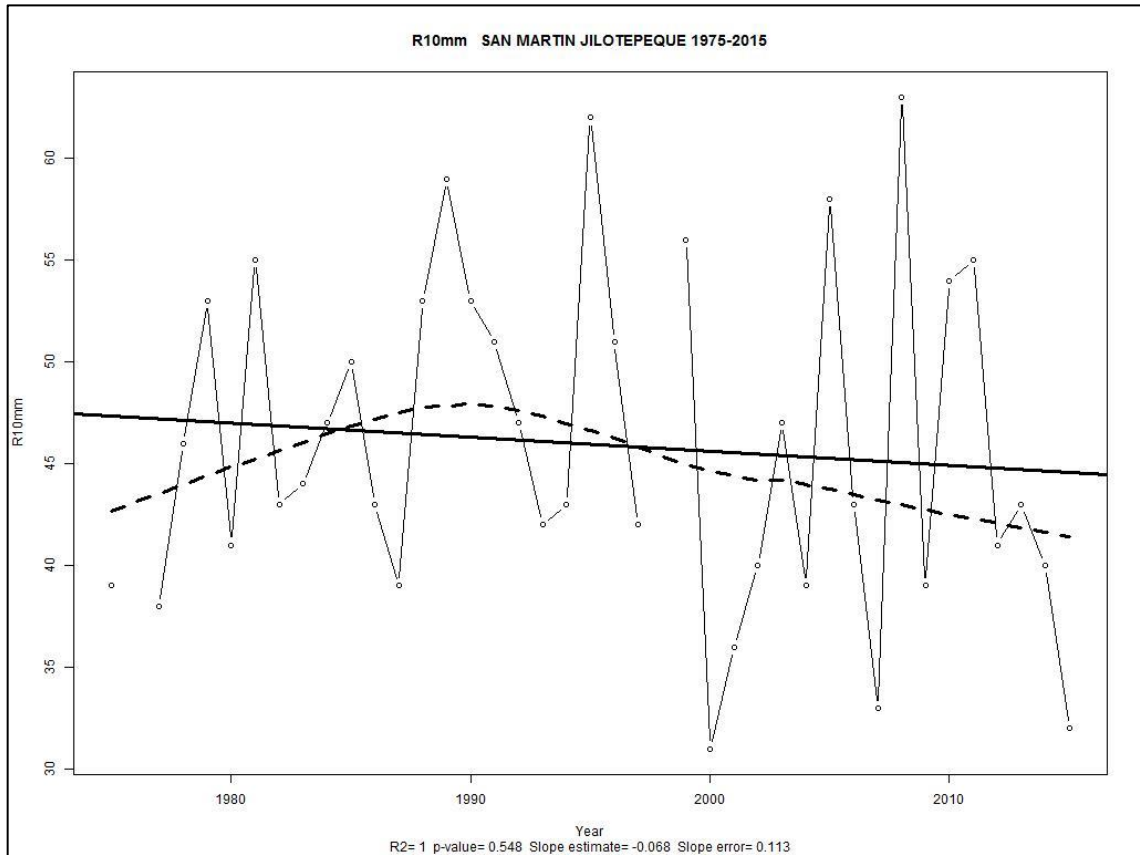
Figura 33. Precipitación total al año (PRCPTOT)



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 0,994.

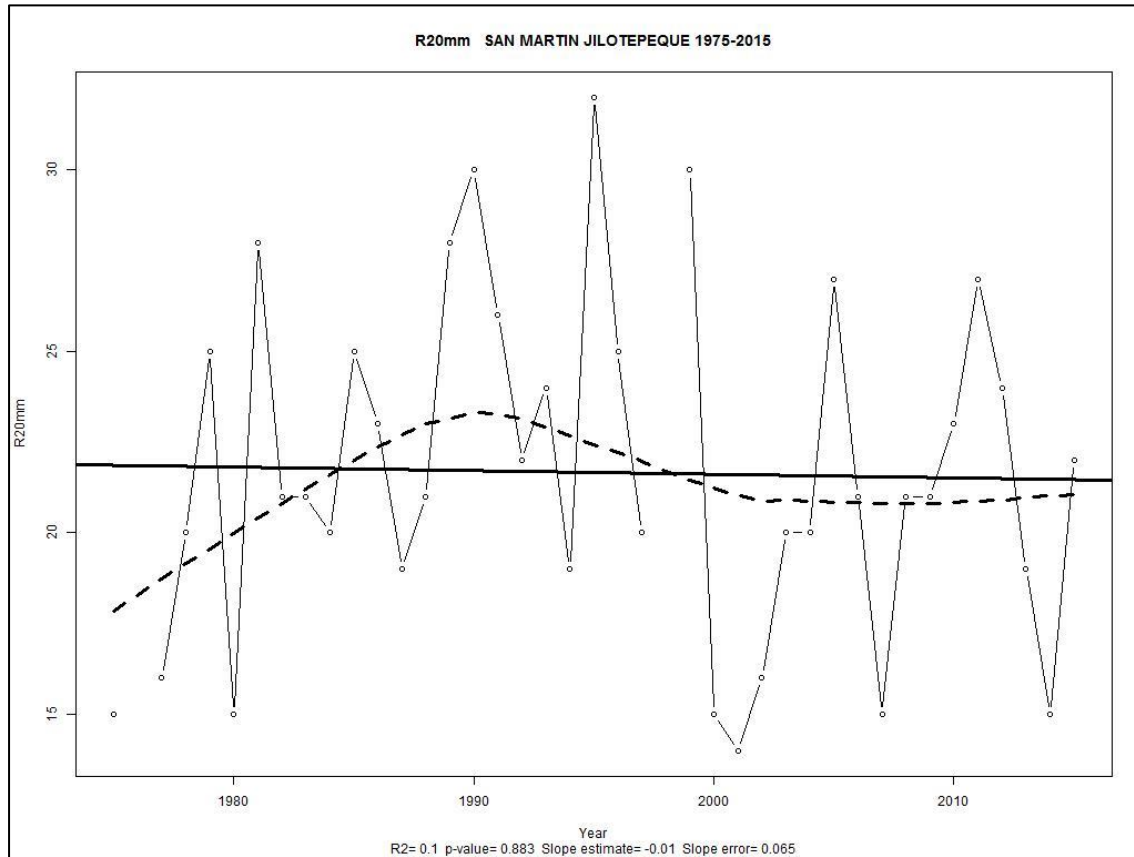
Figura 34. **Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm (R10 mm)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = - 0,068.

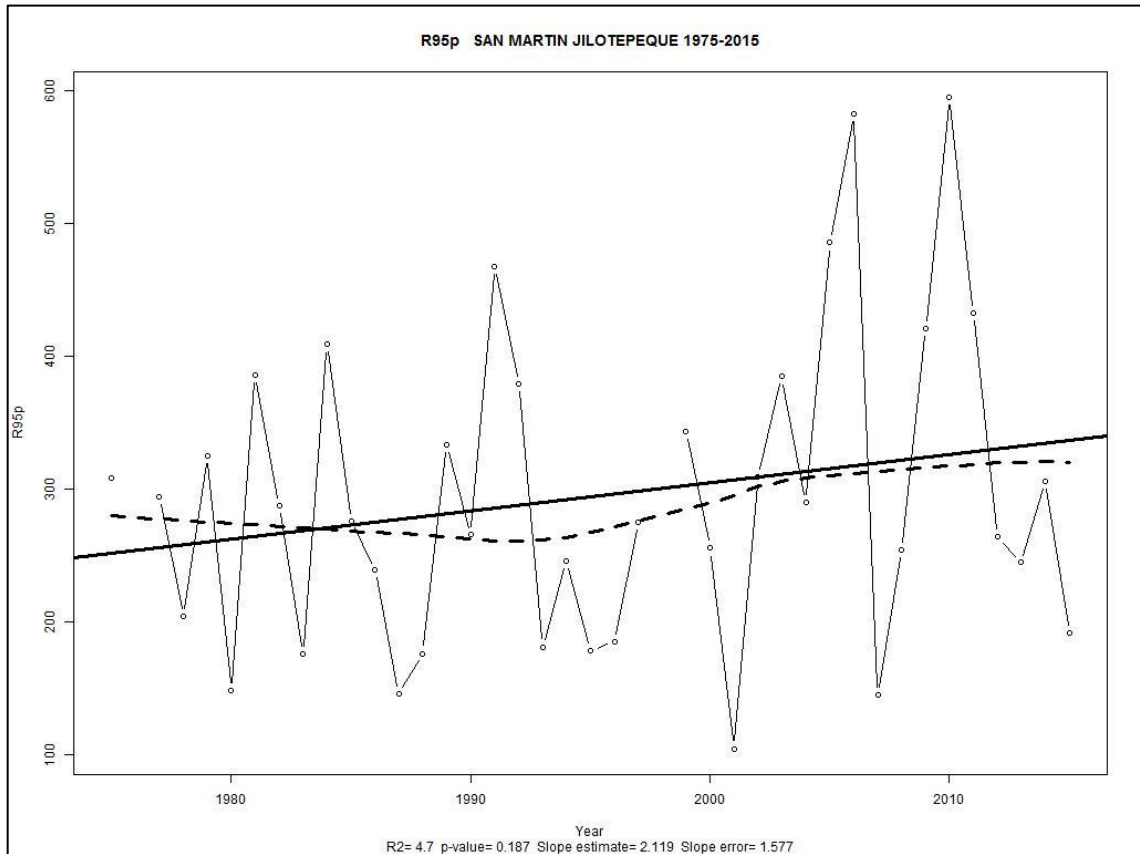
Figura 35. **Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm (R20 mm)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = - 0,010.

Figura 36. **Número de días en un año, con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)**



Fuente: elaboración propia, empleando software RClmDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 2,119.

4.5. Resultados

A continuación se presentan los resultados:

4.5.1. Índices para la precipitación

El objetivo de este estudio es analizar la variabilidad en los índices o indicadores relacionados a la precipitación en la cuenca del río Motagua y además observar si los mismos se asocian a los efectos del cambio climático, por lo que, mediante el software RClimDex, se obtuvieron los índices y tendencias para cada estación, en donde el signo (+) significa una tendencia positiva, es decir, un incremento, y el signo (-) significa tendencia negativa o disminución, los resultados se muestran a continuación:

Tabla IV. Resumen de índices para la precipitación

Estación	Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm	Tendencia	Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm	Tendencia	Mayor número de días secos consecutivos en un año	Tendencia	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año	Tendencia	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95	Tendencia	Precipitación total al año	Tendencia
	Puerto Barrios	-0,111	-	-0,059	-	0,003	+	-0,153	-	6,056	+	2,859
San Martin Jilotepeque	-0,068	-	-0,010	-	-0,092	-	-0,016	-	2,119	+	0,994	+
Santa Cruz Balanya	0,303	+	0,134	+	0,585	+	0,004	+	2,990	+	6,278	+
Potrero Carrillo	-0,055	-	-0,019	-	0,403	+	0,013	+	1,516	+	0,257	+
La Suiza Contenta	0,042	+	0,138	+	-0,976	-	0,010	+	3,479	+	9,071	+
La Unión	0,147	+	0,199	+	-0,071	-	-0,065	-	11,407	+	9,404	+
Pasabien	0,045	+	0,077	+	0,882	+	-0,024	-	4,899	+	5,073	+
INSIVUMEH	0,299	+	0,250	+	0,382	+	-0,005	-	7,558	+	11,436	+

Fuente: elaboración propia.

4.5.2. Índices para la temperatura media diaria

A continuación se muestran los resultados relacionados a la variabilidad en los índices o indicadores relacionados a la temperatura media diaria en la cuenca del río Motagua para observar si los mismos se asocian a los efectos del cambio climático, de la misma manera mediante el software RClimDex se obtuvieron los índices y tendencias para cada estación, en donde el signo (+) significa una tendencia positiva, es decir, un incremento, y el signo (–) significa tendencia negativa o disminución, los resultados se muestran a continuación:

Tabla V. Resumen de índices para la temperatura media diaria

Estación	Días al año cuando la temperatura máxima diaria mayor a 25 °C	Tendencia	Días al año cuando la temperatura mínima diaria mayor a 20 °C	Tendencia
Puerto Barrios	0,395	+	1,018	+
San Martin Jilotepeque	0,852	+	0,003	+
Santa Cruz Balanya	-0,081	-	* D,I,	
Potrero Carrillo	-0,178	-	* D,I,	
La Suiza Contenta	0,519	+	* D,I,	
La Unión	0,853	+	0,298	+
Pasabien	-0,797	-	0,050	+
INSIVUMEH	3,505	+	0,007	+

*D.I. o datos insuficientes para ser procesados por RClimDex.

Fuente: elaboración propia.

4.6. Tendencia de la precipitación

Se efectúa este análisis considerando que puede reflejar tendencias positivas o negativas, las cuales pondrán en evidencia las regiones de la cuenca, que pueden sufrir aumento o disminución en la ocurrencia de eventos relacionados a precipitaciones.

4.6.1. Tendencia de la precipitación total anual

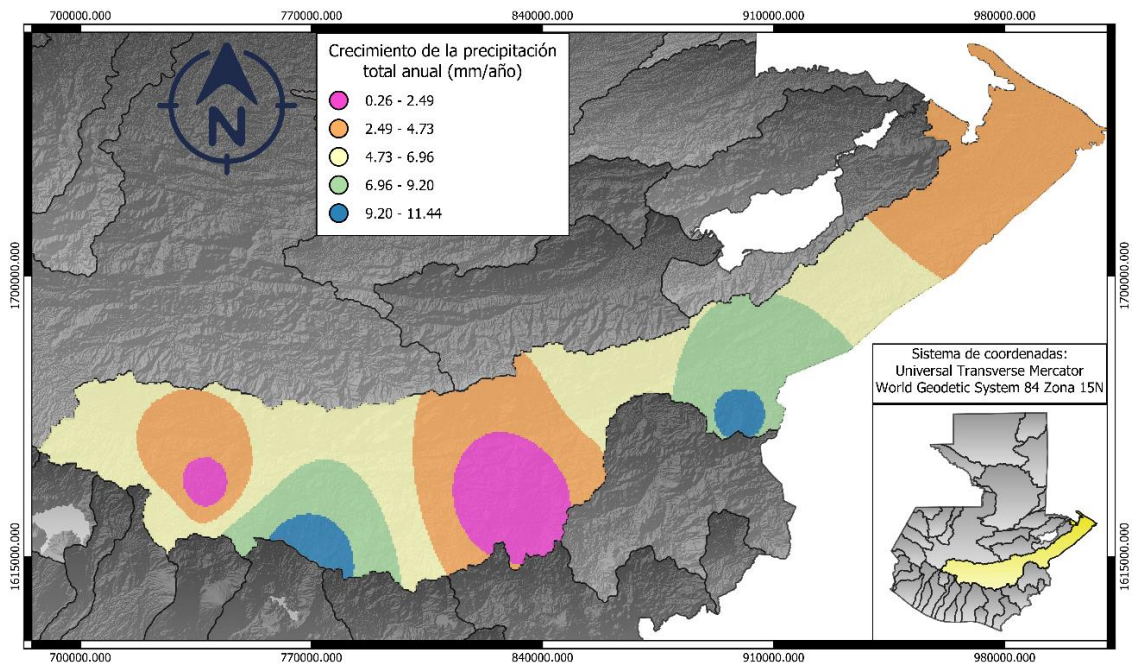
Para el análisis adecuado de la precipitación total anual en esta cuenca se utilizaron rangos de diferente color, a fin de apreciar la manera en que crece o decrece la tendencia a eventos relacionados con precipitaciones.

Los colores azul y verde indican que para esas regiones de la cuenca existe un marcado incremento en cuanto a la tendencia de los eventos de precipitación, cabe mencionar que la meseta central de Guatemala fue una de las regiones más devastadas por la tormenta tropical Agatha en el año 2010, y es precisamente en esa región, así como en la estación La Suiza Contenta, donde se concentra un aumento en cuanto a la ocurrencia de dichos eventos

Los colores amarillo y naranja indican que para la mayor parte de la cuenca existe un moderado incremento en cuanto a la tendencia de eventos de precipitación.

El color violeta indica que para esa región el aumento es leve en cuanto a la tendencia de eventos de precipitación, pero la zona en donde dicho aumento se vuelve mucho más leve es en la zona cercana a los departamentos de El Progreso y Jalapa, los cuales forman parte de una región en donde predomina el clima semiárido.

Figura 37. **Indicador relacionado con la tendencia de la precipitación total anual (PRCPTOT)**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS y modelo de elevación digital.

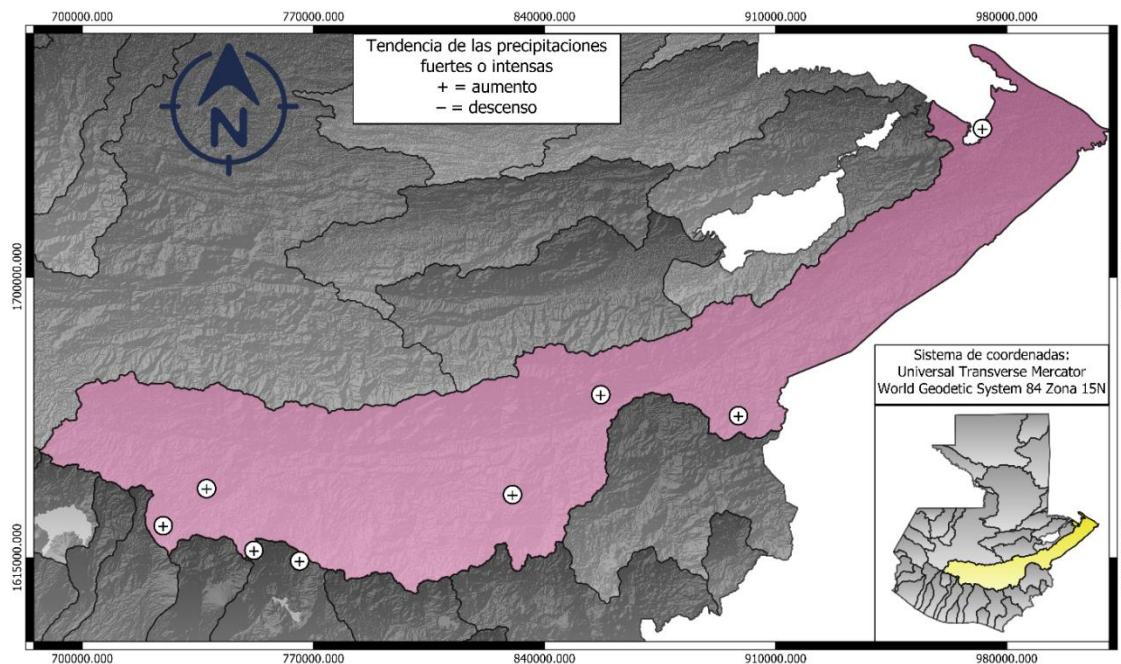
4.6.2. **Tendencia de las precipitaciones fuertes**

Para analizar la tendencia a las precipitaciones fuertes o intensas, RCLimDex utiliza el índice o indicador R95p, el cual analiza las precipitaciones de mayor intensidad y permitió establecer lo siguiente:

De manera similar a la tendencia para los índices para la precipitación total anual, el comportamiento de las precipitaciones de alta intensidad (tormentas o aguaceros) posee una tendencia al incremento para este tipo de eventos extremos.

Las tendencias más marcadas en el incremento de las precipitaciones fuertes se localizan en las estaciones INSIVUMEH y La Unión, ambas localizadas en la parte baja de la cuenca, así como en la estación Puerto Barrios localizada en el Departamento de Izabal.

Figura 38. **Indicador relacionado con la tendencia de las precipitaciones fuertes o intensas (R95p)**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS y modelo de elevación digital.

4.7. Tendencia de la temperatura media diaria

El software RClimDex proporciona los índices SU25 y TR20, los cuales fueron utilizados para determinar la tendencia en la temperatura de la cuenca del río Motagua.

4.7.1. Tendencia de la temperatura máxima diaria mayor a 25 grados Celsius

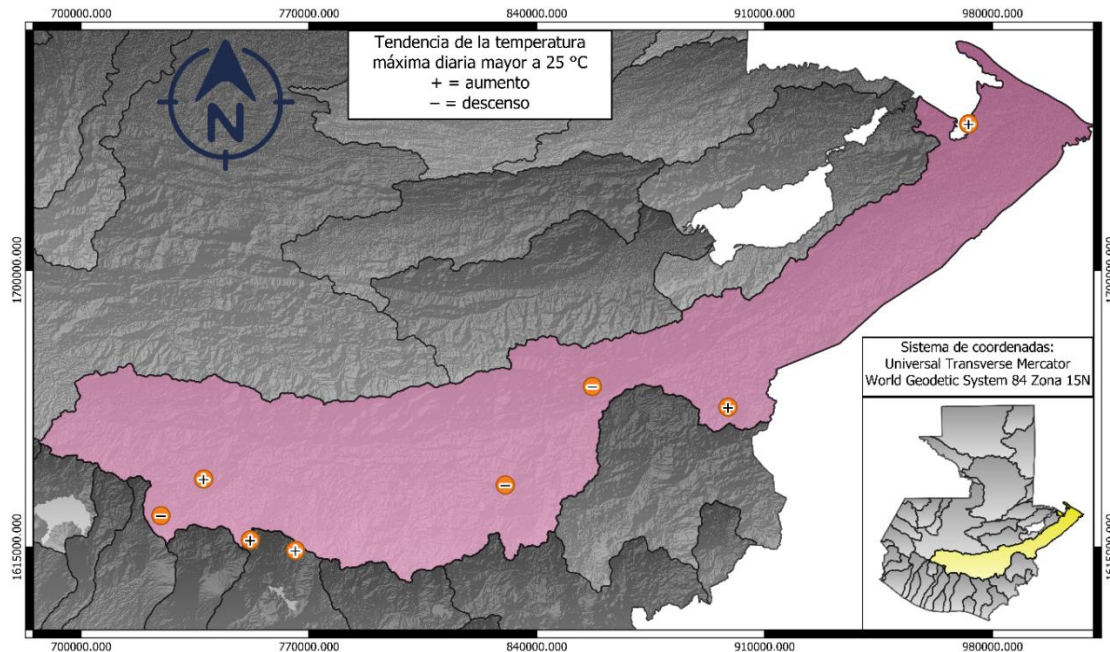
El índice SU25 establece la relación en la cual se presentan la mayor cantidad de días en que la temperatura máxima diaria es mayor a 25 °C, lo cual se interpreta como días con más calor a través del tiempo.

Se puede observar que, de las ocho estaciones analizadas, cinco de ellas presentan un aumento en la cantidad de días con temperaturas máximas mayores a 25 °C, mientras que en las otras tres estaciones disminuye el número de días con tales temperaturas.

Con base en el mapa de tendencias se puede establecer que la cantidad de días con temperaturas máximas mayores a 25 °C tiende a disminuir en la parte central de la cuenca, mientras que el resto de la cuenca muestra un incremento en la cantidad de días con las temperaturas antes mencionadas.

Se muestra a continuación, un mapa donde se localizan las estaciones y la tendencia que las mismas adquieren:

Figura 39. **Indicador relacionado con la tendencia de temperatura máxima diaria mayor a 25 °C (SU25)**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS y modelo de elevación digital.

4.7.2. **Tendencia de la temperatura mínima diaria mayor a 20 grados Celsius**

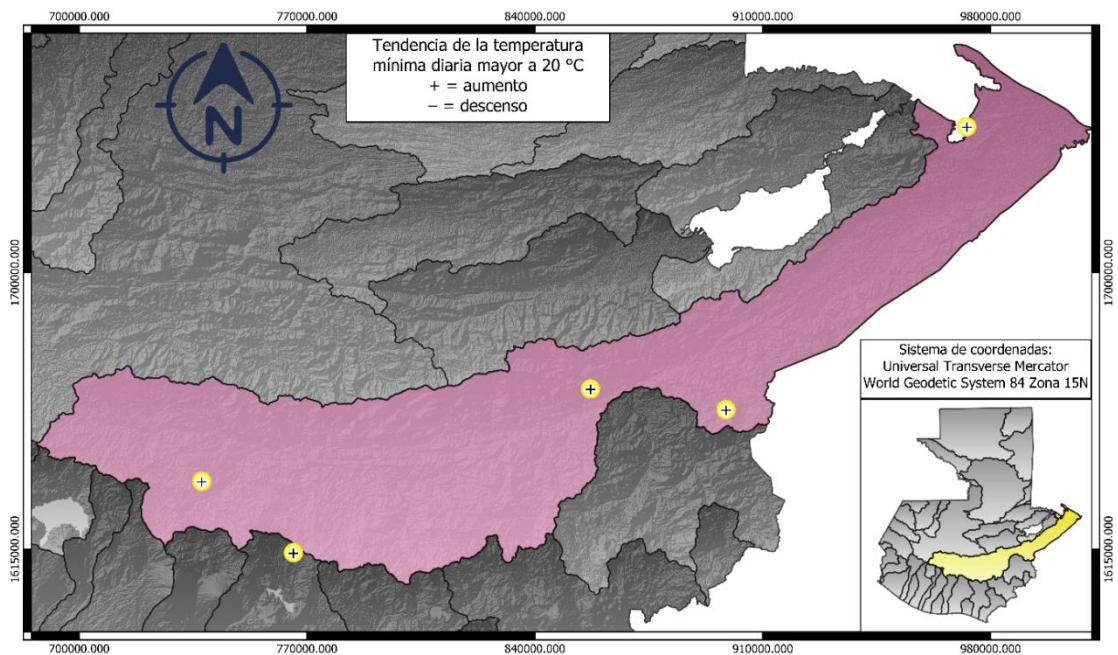
El índice TR20 establece la relación en la cual se presentan la mayor cantidad de días en que la temperatura mínima diaria es mayor a 20 °C, lo cual se interpreta como noches tropicales.

Se puede observar que, de las ocho estaciones analizadas, cinco de ellas muestran un aumento en la cantidad de días que presentan temperaturas mínimas mayores a 20 °C, mientras que las otras tres restantes no se pudieron analizar bajo este parámetro, pudiendo esto deberse a la inconsistencia de datos para analizar dicho indicador.

Con base en el mapa de tendencias y a la tabla de resultados para los indicadores, se puede establecer que la cantidad de días con temperaturas mínimas mayores a 20 °C tiende a crecer con ritmo similar en toda la cuenca, mientras que para la estación Puerto Barrios el crecimiento es mucho más marcado, por lo que se esperarían noches tropicales en gran parte de la cuenca, mientras que en la región de Puerto Barrios dichas noches podrían ser incluso más cálidas.

Se muestra a continuación, un mapa donde se localizan las estaciones y la tendencia que las mismas adquieren:

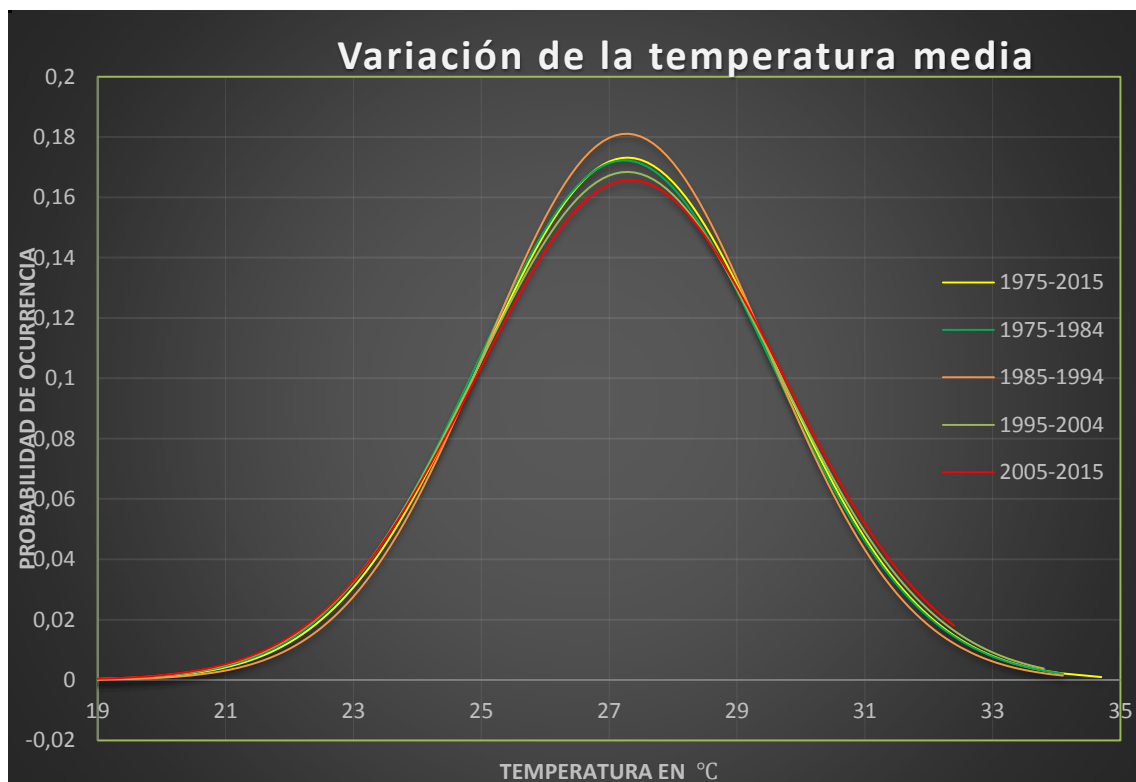
Figura 40. **Indicador relacionado con la tendencia de temperatura mínima diaria mayor a 20 °C (TR20)**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS y modelo de elevación digital.

A fin de visualizar la manera en que ha variado la temperatura media de la cuenca del río Motagua, en su región central y para el periodo 1975-2015, se generó la gráfica para una distribución normal de probabilidades estadísticas considerando las diferentes décadas dentro del periodo establecido, y con ellas se pudo visualizar que las probabilidades de ocurrencia no se desplazan de manera abrupta por cada década, por lo que se puede constatar que la temperatura media de la cuenca se sitúa con mayor probabilidad de ocurrencia entre los 25,5 °C y los 29 °C, registrando la mayor ocurrencia en los 27,5 °C.

Figura 41. **Distribución normal de la temperatura media de la cuenca del río Motagua**



Fuente: elaboración propia.

4.8. Tendencia de la evapotranspiración media anual

La evapotranspiración combina los procesos de pérdida de agua de la superficie del suelo ocasionada por la evaporación y la liberación de agua a la atmósfera debida a la transpiración de la vegetación, en el presente trabajo se hace un análisis de este fenómeno con el fin de conocer las estaciones de la cuenca en donde la tendencia del mismo tiende a incrementarse o disminuirse.

El método de Turc permite obtener el valor para la evapotranspiración real, a través de la siguiente expresión:

$$ETr = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

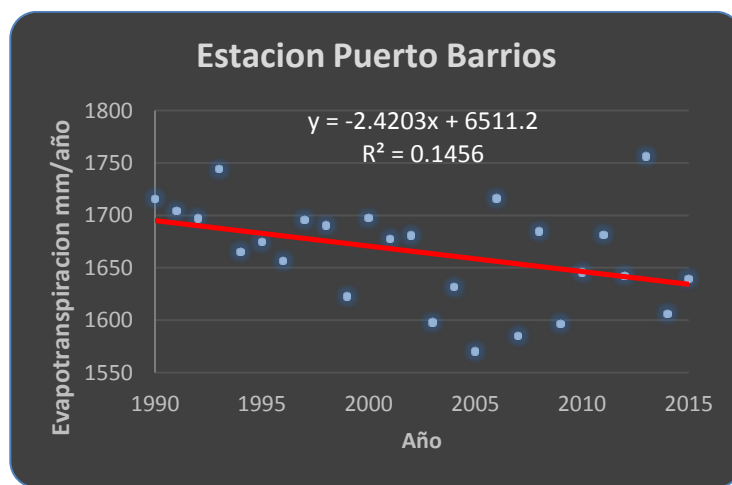
Donde:

- ETr = evapotranspiración real en mm/año
- P = precipitación anual en mm/año
- L = $300+25T+0,05T^3$
- T = temperatura media anual en °C
- Si $P/L < 0,316 \rightarrow ETr=P$

Con los datos de cada estación meteorológica y el método de Turc para el cálculo de la evapotranspiración real, el cual relaciona la temperatura media anual y la precipitación anual, se hace un análisis que muestra la tendencia de la evapotranspiración para cada estación.

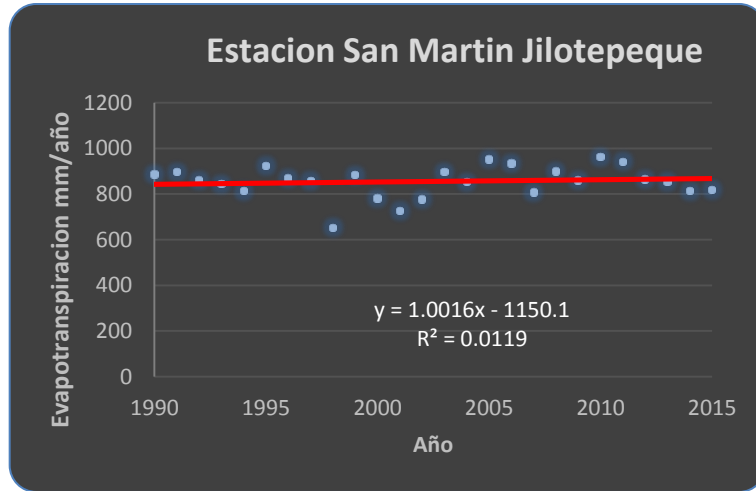
A continuación se adjuntan las gráficas para las estaciones Puerto Barrios y San Martín Jilotepeque, y posteriormente se adjunta la tabla con los índices resultantes para cada estación.

Figura 42. **Tendencia de la evapotranspiración real anual, estación Puerto Barrios**



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Tendencia de la evapotranspiración real anual, estación San Martín Jilotepeque**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Resumen de índices para la evapotranspiración real anual**

Estación	Evapotranspiración real mm/año	Tendencia
Puerto Barrios	2,420	-
San Martín Jilotepeque	1,002	+
Santa Cruz Balanya	3,417	+
Potrero Carrillo	2,055	+
La Suiza Contenta	0,024	+
La Unión	12,687	+
Pasabien	3,131	+
INSIVUMEH	5,134	+

Fuente: elaboración propia.

Según los índices mostrados en la tabla anterior, para el 88 % de las estaciones dentro de la cuenca existe un crecimiento leve en cuanto a la tendencia de la evapotranspiración real, cabe mencionar que la estación La Unión es la que muestra el crecimiento más evidente, mientras que la estación Puerto Barrios es la única que muestra un leve decrecimiento en la referida tendencia.

5. ANÁLISIS DE CAUDALES

5.1. Análisis de información

Con los datos provenientes de las estaciones hidrométricas pertenecientes al INSIVUMEH se efectuará el análisis de los caudales en la cuenca del río Motagua, tomando como periodo de estudio entre los años 1975 hasta 2000.

En los siguientes numerales se podrá visualizar la manera en que se comportan los caudales a través del tiempo, así como la tendencia que los mismos presenten.

5.2. Datos

Para analizar los caudales de una manera confiable es necesario contar con una base de datos diaria consistente y lo más extensa posible en el tiempo, por lo que se trabajó con los caudales medios diarios provenientes de las estaciones pertenecientes al INSIVUMEH, y que además presentaban consistencia en sus registros de por lo menos 15 años, motivo por el cual se seleccionaron únicamente cuatro estaciones.

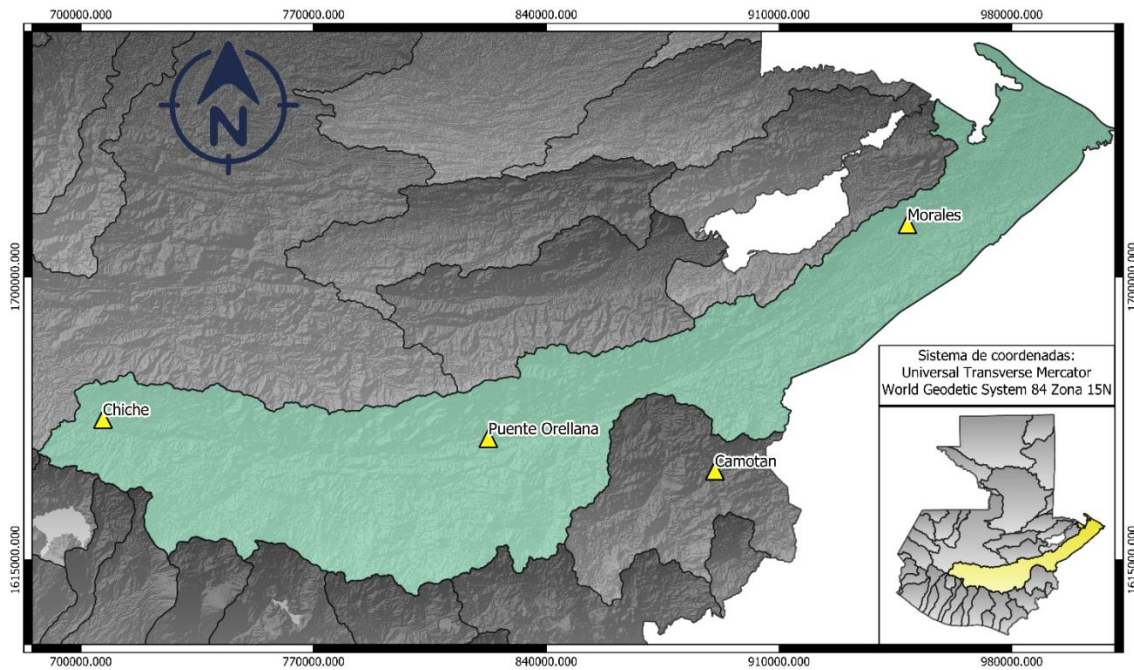
A continuación se enlistan las estaciones analizadas, su ubicación y el periodo estudiado para cada una de ellas:

Tabla VII. **Estaciones hidrométricas analizadas**

Estación	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)	Primer año	Ultimo año
Morales	-88,82083	15,479722	33	1975	2000
Puente Orellana	-90,00194	14,919167	265	1975	2000
Chiché	-91,07833	14,9825	1847	1975	2000
Camotán	-89,37083	14,822222	410	1975	2000

Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Ubicación de las estaciones hidrométricas analizadas**

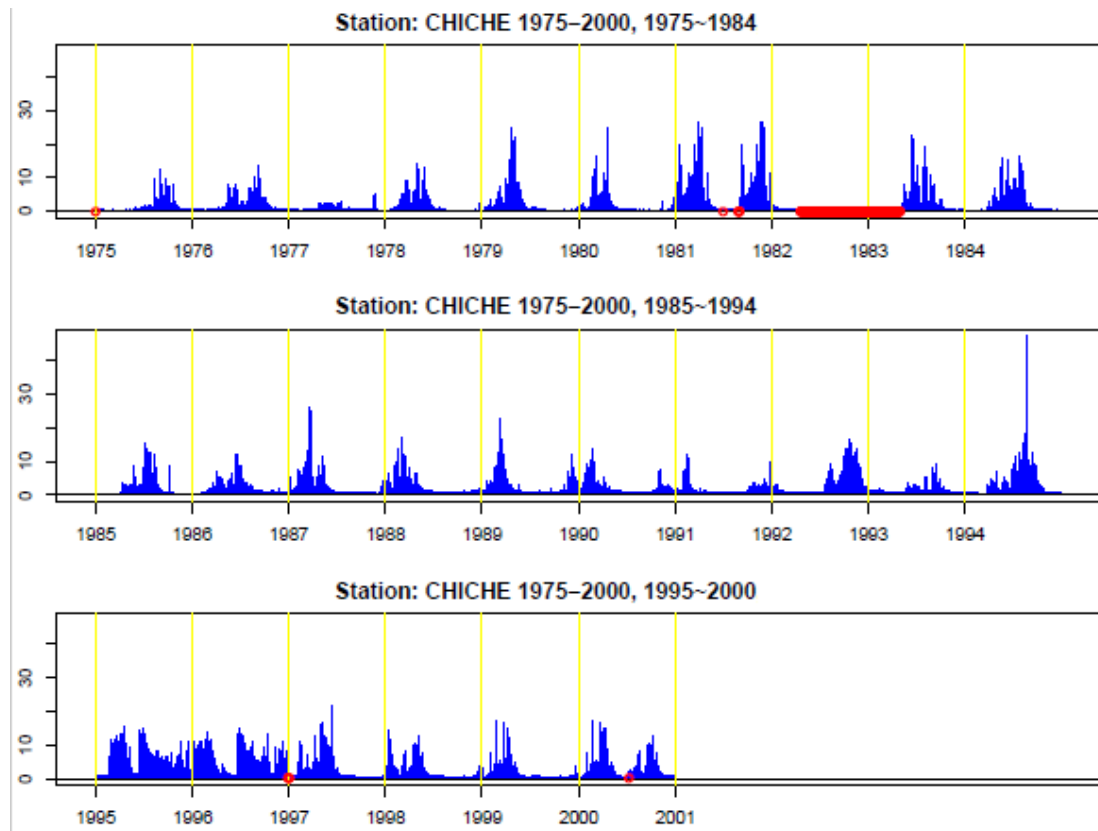


Fuente: elaboración propia, empleando QGIS y modelo de elevación digital con datos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

5.2.1. Rangos y saltos de tiempo en datos

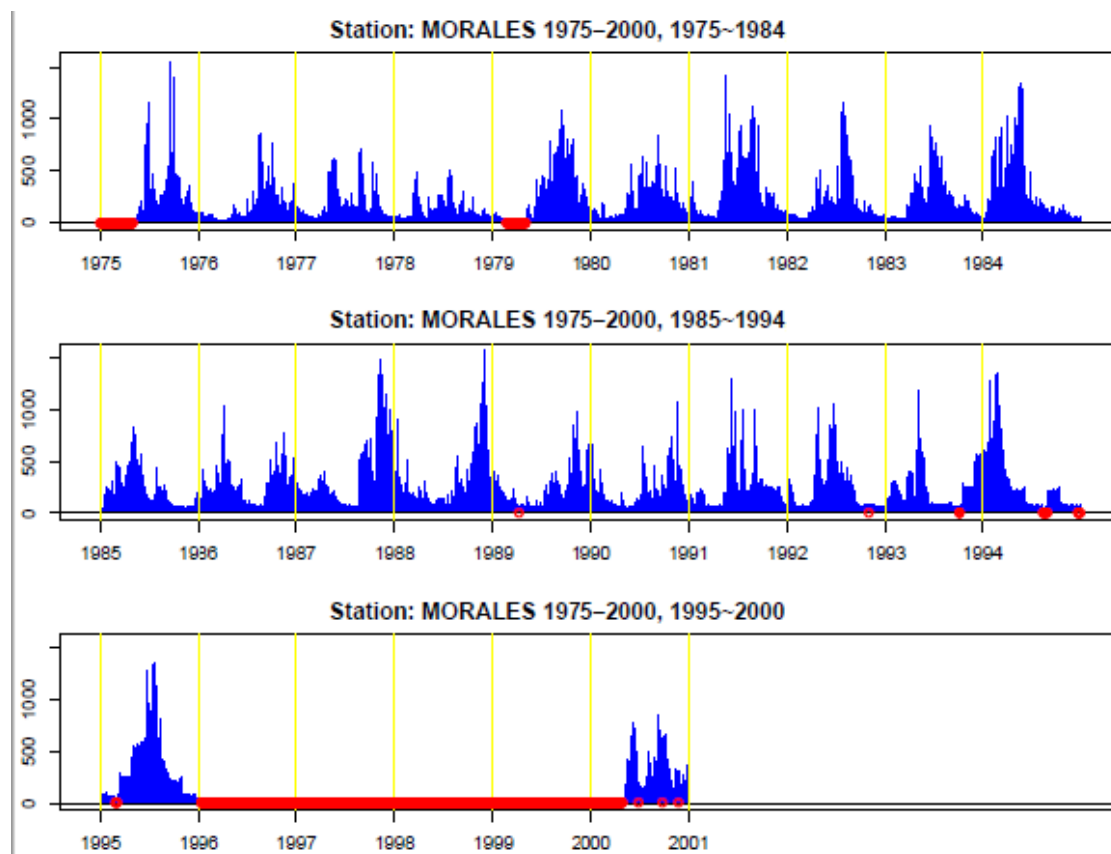
A través del software RClimDex es posible obtener las gráficas de series de caudal, las cuales permiten visualizar el rango de variación de los datos y los saltos de tiempo, en donde se muestran con una línea gruesa de color rojo o círculos del mismo color también los datos faltantes que por razones desconocidas no se tabularon en su momento, ya sea por desactivación temporal de la estación de o por cualquier otra causa. A fin de ejemplificar se seleccionaron las estaciones de Chiché y Morales.

Figura 45. Estación Chiché, series de caudal



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Figura 46. Estación Morales, series de caudal



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

En las figuras anteriores, tanto para la estación Chiché como para la estación Morales, se puede ver la manera en la que varía el caudal a lo largo del tiempo de estudio, siendo notorio además que existen espacios vacíos, representados con una línea roja o círculos, lo cual indica que no existe suficiente cantidad de datos para ese periodo de tiempo, ya sea por desperfectos de la estación o desactivación temporal de la misma.

Al momento de comparar las gráficas de series de caudal para la estación Chiché y Morales, es notoria la diferencia en cuanto a sus registros, ya que se puede notar que los datos que maneja la estación Morales oscilan entre los 500 y 800 metros cúbicos por segundo, mientras que la estación Chiché mantiene rangos que oscilan entre los 15 y 25 metros cúbicos por segundo, lo cual coincide en el hecho que la estación Chiché se encuentra en la parte alta de la cuenca, mientras que la estación Morales se localiza en la parte baja de la misma, lugar donde los afluentes vierten sus aguas.

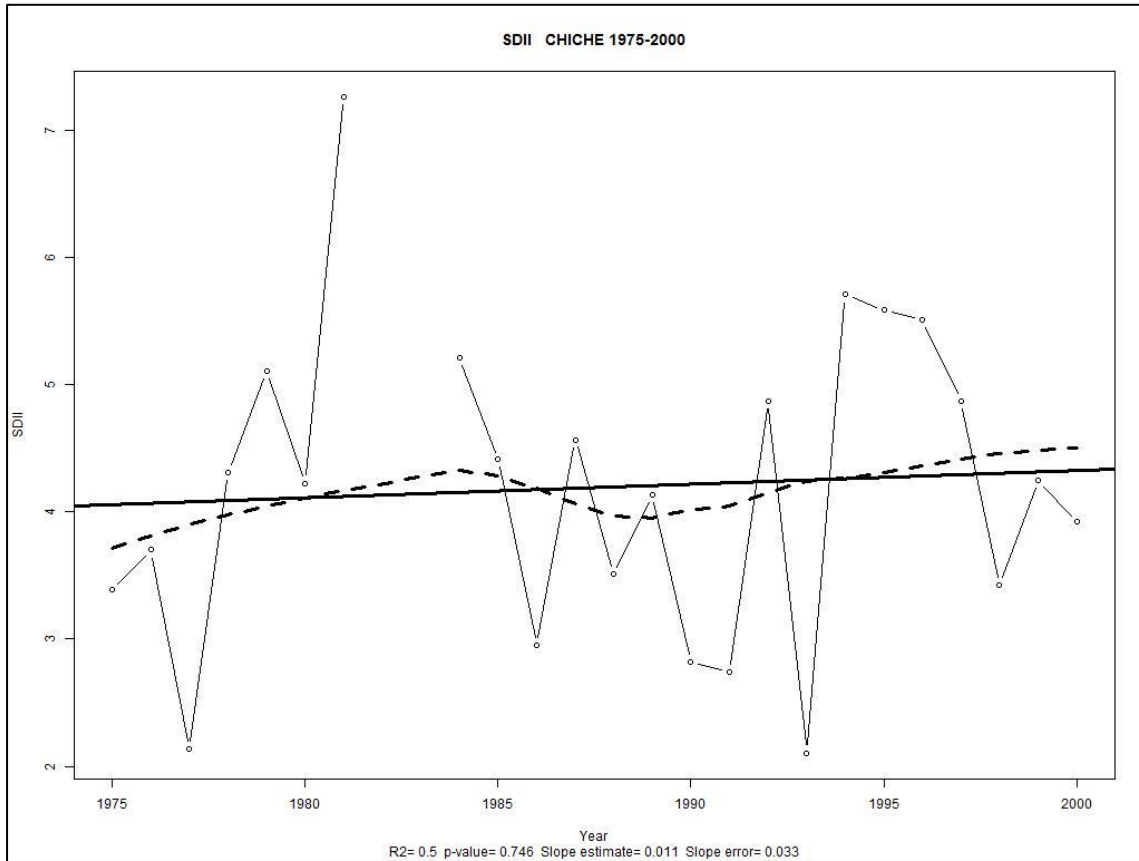
5.3. Generación y gráfico de índices

Para determinar el caudal promedio anual en cada estación es necesario tomar los caudales medios diarios, en metros cúbicos por segundo, ya que este es el promedio de caudal medio diario por año que se obtuvo de las estaciones que se tienen en estudio, luego este caudal será el factor indicador del aumento o disminución del caudal, se efectuó el análisis para cada estación contra el tiempo transcurrido en cada una de ellas.

Con fines de visualización el software RClimDex proporciona gráficas de series anuales para caudales, junto con las tendencias calculadas mediante regresión lineal de mínimos cuadrados (línea sólida) y regresión lineal con ponderamientos locales (línea punteada).

Se analizó el índice SDII, modificado para su uso en caudales, a manera de visualizar la manera en que se comporta el factor indicador para la tendencia del caudal medio anual, dando como resultado las siguientes gráficas:

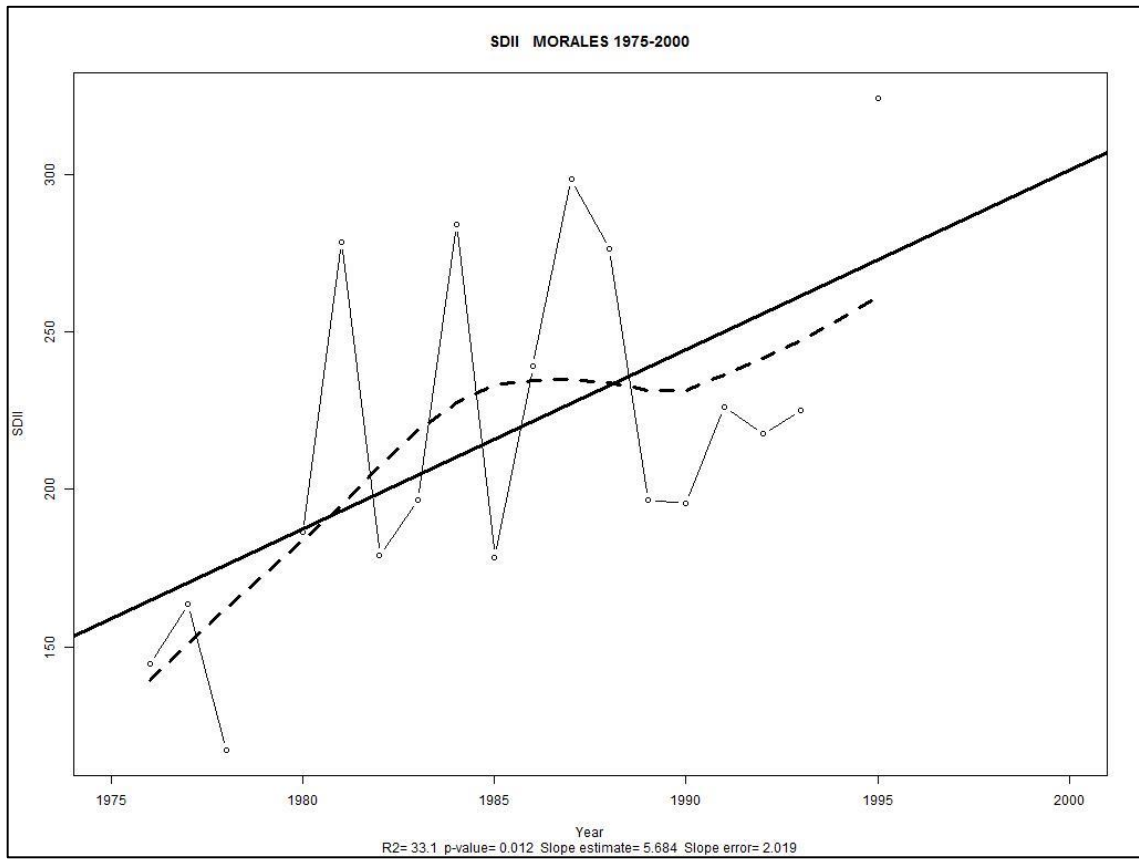
Figura 47. Caudal medio anual en la estación Chiché



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 0,011.

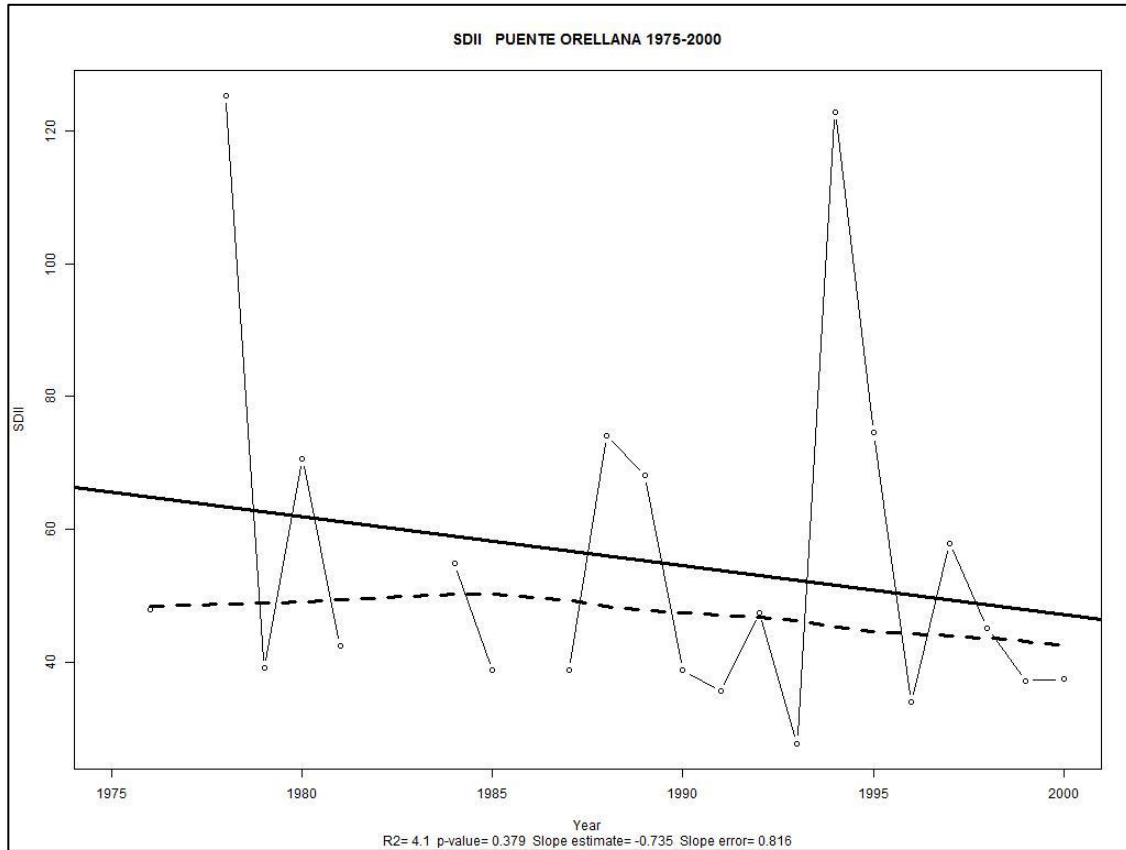
Figura 48. Caudal medio anual en la estación Morales



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 5,684.

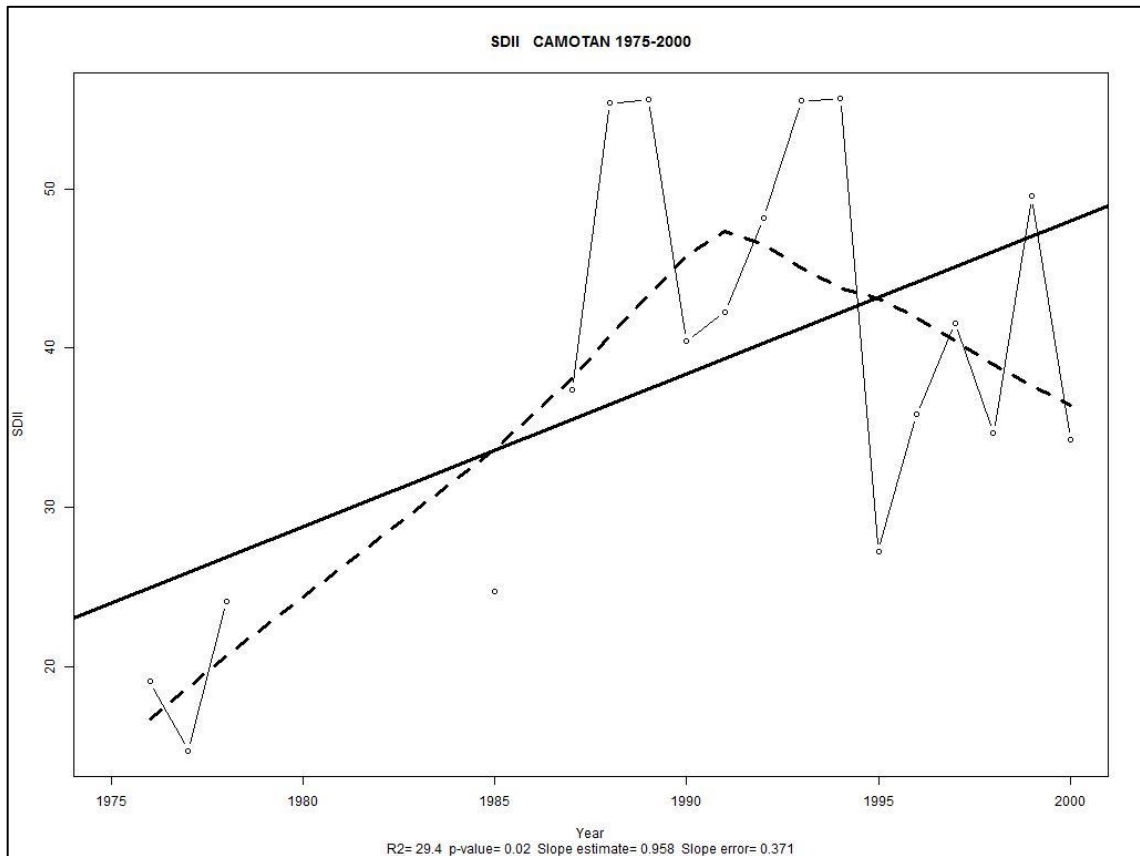
Figura 49. Caudal medio anual en la estación Puente Orellana



Fuente: elaboración propia, empleando software RCLimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = - 0,735.

Figura 50. Caudal medio anual en la estación Camotán



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 0,958.

5.4. Tendencia y resultados del caudal medio anual

Para analizar la tendencia del caudal medio anual se utilizó el índice o indicador SDII, modificado para su uso en caudales, el cual permitió establecer lo siguiente:

Tabla VIII. **Resumen de índices para el caudal medio anual**

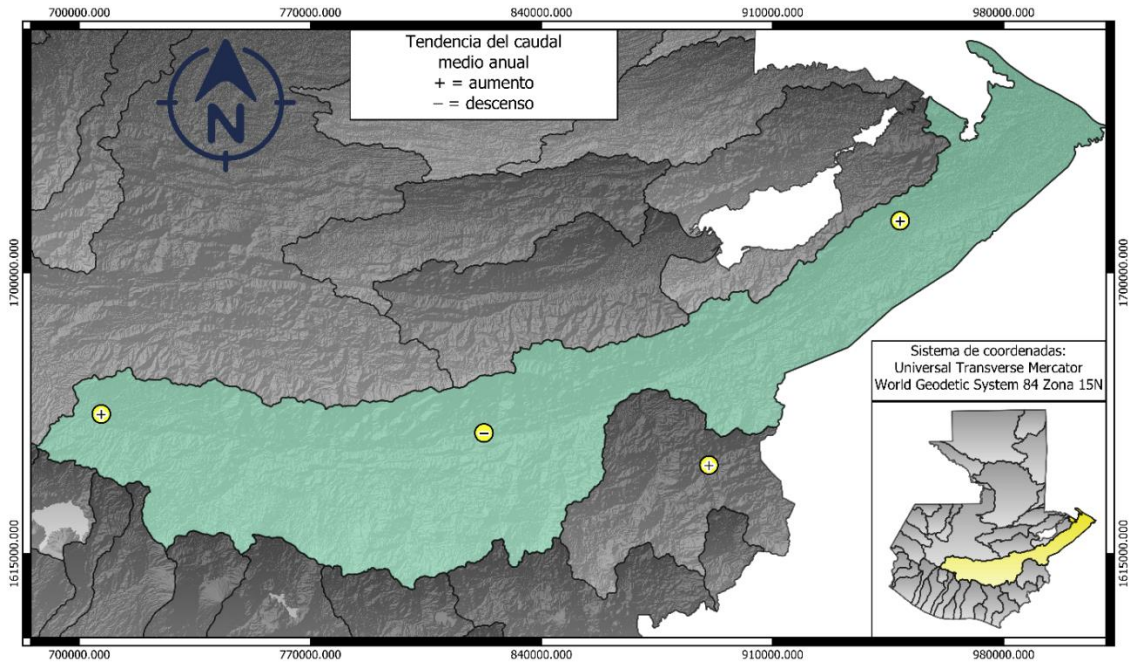
Estación	Elevación (msnm)	Caudal medio anual m³/año	Índice del Caudal medio anual m³/año	Tendencia
Morales	33	79 476,81	5,684	+
Puente Orellana	265	18 901,67	-0,735	-
Chiché	1847	846,9	0,011	+
Camotán	410	14 019,67	0,958	+

Fuente: elaboración propia.

De las estaciones analizadas todas poseen una tendencia positiva, es decir un incremento en la probabilidad de ocurrencia, pero cabe destacar que la única que posee una tendencia significativa es la estación Morales, localizada en la parte baja de la cuenca, mientras que para la estación Puente Orellana, localizada en la parte media, existe una leve tendencia al decremento.

A fin de visualizar la manera en que se comporta la tendencia del caudal medio anual dentro de la cuenca, se presenta la siguiente figura:

Figura 51. **Indicador relacionado con la tendencia del caudal medio anual**

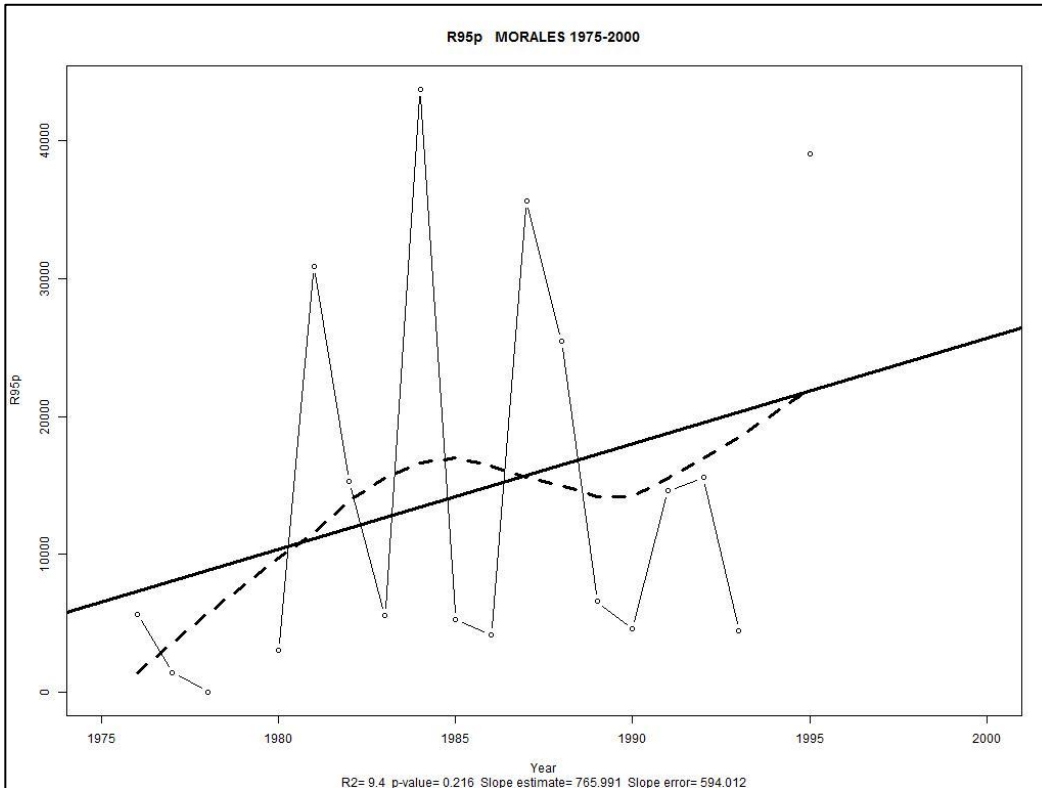


Fuente: elaboración propia, empleando QGIS y modelo de elevación digital.

5.5. **Tendencia del caudal extremo**

Tomando como evidencia la siguiente figura, se establece que en la estación Morales, localizada en el Departamento de Izabal, es en donde existe el mayor incremento en cuanto a la tendencia de caudales extremos o eventos relacionados con crecidas de ríos, lo cual indica que con el paso del tiempo tales crecidas irán en aumento debido a las precipitaciones extremas que suceden en temporada de lluvias para la región antes mencionada.

Figura 52. Caudal extremo en estación Morales



Fuente: elaboración propia, empleando software RClimDex.

Tendencia estimada (*slope estimate*) = + 765,991.

5.6. Comparación del caudal contra la precipitación

Luego de analizar los índices relacionados a la tendencia de precipitaciones y caudal respectivamente, se puede corroborar la relación directa entre los resultados de caudal y precipitación, ya que en las regiones de la cuenca en donde la tendencia a la precipitación crece ocurre lo mismo con la de caudales.

Con base en la tabla de índices y resultados se puede decir que en el resto de estaciones la tendencia en cuanto a los eventos relacionados a la precipitación y caudal es de un crecimiento leve, por lo que se esperan precipitaciones y caudales cuyos niveles irán en aumento con el transcurrir de los años, también se observa que en la parte central de la cuenca existe un leve decrecimiento en la tendencia de caudales, lo cual coincide con la figura que muestra el indicador relacionado con la tendencia de la precipitación total anual, la cual indica que en esa zona el crecimiento para los eventos de precipitación es relativamente bajo.

En la estación Morales, localizada al final de la cuenca, es en donde existe la tendencia más significativa en cuanto al aumento en los niveles de caudal medio anual y es precisamente allí que efectivamente el número de días con posibilidad de lluvia mayor al percentil 95, es decir aguaceros, aumenta, por lo que existe coherencia entre dichas tendencias.

CONCLUSIONES

1. Con base en los índices analizados se hace evidente la tendencia al aumento generalizado en cuanto a los eventos de precipitación total anual y precipitaciones fuertes o intensas en toda la superficie de la cuenca, haciendo notar que en las regiones aledañas a los departamentos de El Progreso y Jalapa, dicha tendencia no es tan significativa, debido a que tales departamentos se localizan en una región muy vulnerable a sequías debidas al clima semiárido propio de la zona.
2. En la parte este y oeste de la cuenca, especialmente en regiones cercanas a la estación INSIVUMEH, La Unión y Puerto Barrios, la tendencia relacionada a precipitaciones fuertes o intensas suele tener un crecimiento significativo, lo cual se traduce en temporadas de lluvia intensa o parcialmente intensa en las regiones antes mencionadas.
3. Según los índices de la temperatura media diaria, se pudo establecer que la cantidad de días cálidos en un año tiende a disminuir en la parte central de la cuenca, mientras que el resto de la cuenca muestra un aumento moderado en la tendencia para referidos días; además en toda la cuenca se aprecia un leve crecimiento respecto a la cantidad de días con temperaturas mínimas mayores a 20 °C, es decir, noches tropicales, sin embargo, en regiones cercanas a la estación Puerto Barrios el crecimiento es más significativo, lo cual indica que en esa región las noches serán más cálidas con el paso del tiempo.

4. Con base en los índices para la evapotranspiración real, la superficie de la cuenca muestra un leve crecimiento en cuanto a la probabilidad de ocurrencia de la misma, sin embargo, cabe mencionar que en regiones cercanas al departamento de Izabal dicha probabilidad disminuye moderadamente.
5. La tendencia relacionada al caudal medio anual muestra un aumento generalizado en toda la cuenca, haciéndose más notorio en el Departamento de Izabal, por lo que se espera que en esa región los eventos relacionados a precipitaciones fuertes o intensas, como lo son las crecidas de ríos, por ejemplo, vayan en aumento, a excepción de regiones cercanas a la estación Puente Orellana, ya que en dichas regiones se evidencia una leve disminución en dicha tendencia.
6. Se hace evidente una correlación entre las tendencias relacionadas a eventos de precipitación y caudal, ya que en las regiones en donde las lluvias se presentan con mayor intensidad es precisamente en donde se concentran los eventos relacionados a caudales extremos como las crecidas de ríos, lo cual además indica coherencia entre los datos y los análisis efectuados.

RECOMENDACIONES

1. Efectuar estudios y análisis similares a los propuestos en el presente trabajo de graduación en otras cuencas del país.
2. Con la finalidad de obtener resultados mucho más precisos y poder estudiar con mayor detalle y exactitud todas y cada una de las variables climatológicas, se hace necesario implementar nuevos puntos de control meteorológico e hidrométrico en la cuenca del río Motagua, así como tratar de mantener en buen estado las estaciones que actualmente se encuentran operando, a fin de contribuir a investigaciones futuras.
3. Establecer una alianza entre instituciones públicas, privadas e INSIVUMEH, a fin de mantener un programa de actualizaciones constantes en los registros de las estaciones meteorológicas e hidrométricas, para que al momento de querer efectuar un estudio similar al presente, se tenga un campo mucho más amplio.
4. Debido a la extensión de la cuenca del río Motagua se recomienda que, en época de estiaje y época lluviosa, periódicamente se efectúen análisis de caudal en puntos estratégicos de la misma, con el objeto de evaluar el comportamiento del recurso hídrico en la cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

1. BATEMAN, Allen. *Hidrología básica y aplicada*. Barcelona: Grupo de Investigación en transporte de sedimentos. 2007. 70 p.
2. CHEREQUE, Wendor. *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. 2a ed., Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, 1989. 223 p.
3. Climate Research Branch Environment Canada Downsview. *Manual del usuario RClimDex (1.0)*. Canadá: CIIVEN, 2004. 22 p.
4. ENAVIDES BALLESTEROS, Henry Oswaldo; LEÓN ARISTIZABAL, Gloria Esperanza. *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Guatemala: INSIVUMEH-Ideam. Subdirección de Meteorología, 2007. 102 p.
5. FERNÁNDEZ CARRASCO, Pedro. *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos: aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España*. Tesis Doctoral. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2002. 267 p.
6. Fundación para la Conservación de los Recursos Naturales y Ambiente en Guatemala. *Diagnóstico preliminar de situación de la cuenca del río Motagua*. FCG. 2012. Guatemala. 78 p.

7. GONZÁLEZ FIGUEROA, A. *Diagnóstico preliminar de la cuenca hidrográfica binacional Motagua (Guatemala-Honduras)*. 1988. Documento Trifinio No. 10. 62 p.
8. Instituto Nacional de Estadística. Estimaciones de la población total por municipio. Periodo 2008-2020. Organismo Judicial de Guatemala. [en línea] <<http://www.oj.gob.gt/estadisticaj/files/población-total-por-municipio1.pdf>>. [Consulta: 15 de agosto de 2018].
9. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Datos diarios de la red de estaciones para el periodo 1970 a 2015*. Formato digital. 2018.
10. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA); Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH); Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (MICIVI). *Estimación de amenazas inducidas por fenómenos hidrometeorológicos en la República de Guatemala*. 2002. 46 p.
11. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). *Cuencas hidrográficas de Guatemala*. 2011. 49 p.
12. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda; Dirección General de Caminos. *Caminos de red vial de la República de Guatemala*. [en línea] <<https://www.caminos.gob.gt/rutas-registradas.html>>. [Consulta: 15 de agosto de 2018].