



Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez
Facultad de Ciencias Técnicas
Centro de Estudios Hidrotécnicos



INDICADORES PARA LA DETERMINACIÓN DE EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS PLUVIALES

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias

Yoelkis Hernández Victor, Ing. MSc.

Ciego de Ávila, 2022



Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez
Facultad de Ciencias Técnicas
Centro de Estudios Hidrotécnicos



INDICADORES PARA LA DETERMINACIÓN DE EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS PLUVIALES

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias

Autor: Yoelkis Hernández Victor, Ing., MSc.

Tutor: Oscar Brown Manrique, Ing., Dr.C.

Ciego de Ávila, 2022

PENSAMIENTO

«La emergencia climática es una carrera que estamos perdiendo, pero es una carrera que podemos ganar. La crisis climática está causada por nosotros y las soluciones deben venir de nosotros. Tenemos las herramientas: la tecnología está de nuestro lado».

Antonio Guterres (2019)

DEDICATORIA

**A Yeisabel, mi complemento y mi compañera,
por permitirme construir la vida a su lado,
por iluminar mi camino y ser la alegría en mis días.**

A mi pequeño príncipe Yordan,

Los amos infinitamente.

A mis padres,

por haberme dado la vida y tener confianza en mí.

A mis Hermanas

Por ser mi razón de ser y ejemplos a seguir.

AGRADECIMIENTO

Especial al Doctor Oscar Brown Manrique, por su entrega, dedicación y aportes para la realización de esta investigación como mi tutor.

A mis hermanas, mis padres, mis tíos, mis tías, primos y primas; cada uno ocupa un lugar especial en la familia. Gracias por su alegría que anima siempre a los que les rodea.

A mi esposa e hijo por ser ambos la luz de mi vida.

Agradecimiento a todos los profesores del Centro de Estudios Hidrotécnicos que han colaborado en el desarrollo de este trabajo.

A todos los que de alguna forma pusieron su granito de arena para que pudiera lograr este sueño.

SÍNTESIS

La investigación consistió en un estudio realizado en el municipio Venezuela de la provincia Ciego de Ávila, Cuba, sustentado en el análisis de una serie de 30 años de precipitaciones, número de días con lluvias, temperatura y humedad relativa desde 1990 al 2020 con el objetivo de proponer indicadores para la determinación de evidencias de cambio climático y sus efectos sobre los recursos hídricos pluviales. Los resultados demostraron mediante el análisis integrado de diferentes indicadores como la tendencia lineal, la curva sumaria de las precipitaciones acumuladas, las anomalías climáticas, el climograma y el Índice Porcentaje de Precipitación Normal que existen evidencias de cambios climáticos en las precipitaciones anuales, las precipitaciones del periodo húmedo, las precipitaciones del periodo seco, el número de días con lluvias anuales, el número de días con lluvias en el periodo húmedo, la temperatura media del periodo seco y la sequía meteorológica. Se identificó que los cambios climáticos más notables ocurren entre los últimos cinco y diez años. El Climograma indicó que diciembre, febrero y enero se clasifican como meses secos severos; marzo y noviembre como meses secos fuertes y abril como mes seco incipiente. La magnitud de la sequía meteorológica mostró tendencia a incrementarse en los últimos 10 años. El índice pluvial explicó la factibilidad de utilizar las precipitaciones acumuladas con valores igual o superior a 300 mm para la producción agrícola de cultivos de ciclo corto en sistemas de secano. El software INFO_CLIM desarrollado en esta investigación permite calcular las evidencias de cambio climático en una determinada localidad de forma rápida y precisa.

SUMMARY

The research consisted of a study carried out in the municipality of Venezuela in the province of Ciego de Ávila, Cuba based on the analysis of a series of 30 years of rainfall, number of days with rain, temperature and relative humidity from 1990 to 2020 with the objective of proposing indicators for determining evidence of climate change and its effects on pluvial water resources. The results demonstrated through the integrated analysis of different indicators such as the linear trend, the summary curve of the accumulated rainfall, the climatic anomalies, the climogram and the Normal Precipitation Percentage Index that there is evidence of climatic changes in the annual rainfall, the rainfall of the wet period, rainfall in the dry period, the number of days with annual rains, the number of days with rain in the wet period, the average temperature of the dry period and meteorological drought. It was identified that the most notable climatic changes occur between the last five and ten years. The Climogram indicated that December, February and January are classified as severe dry months; March and November as strong dry months and April as an incipient dry month. The magnitude of the meteorological drought showed a tendency to increase in the last 10 years. The rainfall index explained the feasibility of using accumulated rainfall with values equal to or greater than 300 mm for the agricultural production of short-cycle crops in rainfed systems. The INFO_CLIM software developed in this investigation allows calculating the evidence of climate change in a given location quickly and accurately.

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
1.1 Calentamiento global	11
1.2 Indicadores del calentamiento global	13
1.3 Problemática del cambio climático	13
1.4 Definiciones de cambio climático.....	15
1.5 El clima en el cambio climático	16
1.6 El efecto invernadero	17
1.7 Recursos Hídricos en Cuba.....	17
1.8 Impactos de los Recursos Hídricos superficiales	19
1.9 Precipitaciones.....	20
1.10 Temperatura	21
1.11 Variabilidad estacional.....	21
1.12 Modelos Climáticos.....	23
1.13 Tendencias del Cambio Climático.	24
1.14 Herramientas de computó para el cálculo de indicadores.....	26
1.15 Conclusiones parciales del capítulo	28
2. MATERIALES Y MÉTODOS	30
2.1 Localización del área de estudio	30
2.2 Condiciones climáticas, edáficas y orográficas	31
2.3 Tipo de investigación	32
2.4 Variables analizadas.....	32
2.5 Desestacionalización de la serie temporal de precipitaciones	32
2.5.1 Método de los promedios móviles	32
2.5.2 Método de suavización exponencial	33
2.5.3 Método de los promedios mensuales	33
2.6 Estadígrafos fundamentales de las precipitaciones	36
2.7 Construcción del climograma de Gaussén	36
2.8 Evidencias de cambio climático.....	38
2.9 Caracterización de los meses según los niveles de precipitación	41
2.10 Caracterización de la sequía meteorológica	42

2.11	Evaluación de la sequía meteorológica	43
2.12	Índice pluvial para el desarrollo de la agricultura de secano.....	44
2.13	Impactos de la investigación en la producción agrícola	44
2.14	Desarrollo de un sistema informático para evaluar el cambio climático.....	45
2.15	Validación del sistema informático	45
2.16	Conclusiones parciales	45
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
3.1	Análisis de la desestacionalización de la serie de precipitaciones	47
3.2	Análisis de los estadígrafos fundamentales de las precipitaciones	49
3.3	Análisis del climograma construido para el municipio de Venezuela.....	50
3.4	Análisis de las evidencias de cambio climático	53
3.5	Análisis descriptivo de las lluvias en los últimos diez años	65
3.6	Análisis de la acuosidad estacional e interanual	67
3.7	Análisis de los parámetros característicos de la sequía meteorológica	70
3.8	Análisis del índice pluvial para el desarrollo de la agricultura de secano	74
3.9	Análisis de los impactos de la investigación en la producción agrícola	77
3.10	Análisis del sistema informático para la evaluación del cambio climático.....	78
3.11	Conclusiones parciales	87
	CONCLUSIONES	90
	RECOMENDACIONES	92
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

INDICE DE TABLA

TABLA 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MESES SEGÚN LA PROBABILIDAD DE LA LLUVIA.....	41
TABLA 3.1 ESTADÍGRAFO DE LA SERIE TEMPORAL DE PRECIPITACIONES.....	50
TABLA 3.2 CATEGORÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS MESES SECOS.....	52
TABLA 3.3 CATEGORÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	59
TABLA 3.4 VALORES DE LAS PRECIPITACIONES MENSUALES Y ANUALES EN MM.....	66
TABLA 3.5 ESTADÍGRAFOS FUNDAMENTALES DE LA PRECIPITACIÓN PROMEDIO.....	66
TABLA 3.6 ACUOSIDAD DE LOS MESES SEGÚN LA PROBABILIDAD.....	69
TABLA 3.7 ACUOSIDAD DE LOS AÑOS DE LA SERIE SEGÚN LA PROBABILIDAD.....	69
TABLA 3.8 PARÁMETROS ESTACIONALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA.....	70
TABLA 3.9 PARÁMETROS INTERANUALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA.....	70
TABLA 3.10 VALOR DE SEQUÍA SEGÚN EL ÍNDICE PPN (%) Y SU CLASIFICACIÓN.....	74

INDICE DE FIGURA

FIGURA 1.1 INTERFAZ PRINCIPAL DEL SISTEMA RCLIMDEX v1.0	27
FIGURA 1.2 INTERFAZ PRINCIPAL DEL SISTEMA CLIMAPACTO v1.8.....	28
FIGURA 2.1 LOCALIZACIÓN DE MUNICIPIO VENEZUELA EN CIEGO DE ÁVILA.....	30
FIGURA 3.1 COMPARACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN REAL Y LA DESESTACIONALIZADA.....	48
FIGURA 3.2 SERIES DE PRECIPITACIÓN DEL PERIODO HÚMEDO Y DEL PERIODO SECO.....	48
FIGURA 3.3 PRECIPITACIÓN REAL, CON MEDIA MÓVIL Y CON SUAVIZACIÓN EXPONENCIAL.	49
FIGURA 3.4 CLIMOGRAMA MUNICIPIO VENEZUELA.....	51
FIGURA 3.5 VARIABILIDAD INTERANUAL DE PRECIPITACIONES.....	55
FIGURA 3.6 VARIABILIDAD INTERANUAL DEL NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIAS.	56
FIGURA 3.7 VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA TEMPERATURA MEDIA EN LOS PERÍODOS SECO Y HÚMEDO..	57
FIGURA 3.8 CURVA SUMARIA DE LA PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN LOS ÚLTIMOS 5, 10, 15 Y 20 AÑOS. ...	59
FIGURA 3.9 PATRÓN DE DESPLAZAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN EN LOS ÚLTIMOS 5, 10, 15 Y 20 AÑOS. ...	60
FIGURA 3.10 PATRÓN DE DESPLAZAMIENTO DEL NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIAS EN LOS ÚLTIMOS 5, 10, 15 Y 20 AÑOS.....	62
FIGURA 3.11 ANOMALÍAS DE LAS PRECIPITACIONES ANUALES.	63
FIGURA 3.12 ANOMALÍAS DEL NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIAS.....	63
FIGURA 3.13 ANOMALÍAS DE LA TEMPERATURA.	64
FIGURA 3.14 ANOMALÍAS DE LA HUMEDAD RELATIVA.....	64
FIGURA 3.15 PROBABILIDAD EMPÍRICA DE LAS PRECIPITACIONES MENSUALES.....	68
FIGURA 3.16 PROBABILIDAD TEÓRICA DE LAS PRECIPITACIONES ANUALES DE LA SERIE.....	69
FIGURA 3.17 TENDENCIA LINEAL DE LA MAGNITUD DE LA SEQUIA MENSUAL.	71
FIGURA 3.18 TENDENCIA LINEAL DE LA DURACIÓN DE LA SEQUÍA MENSUAL.	71
FIGURA 3.19 TENDENCIA LINEAL DE LA MAGNITUD DE LA SEQUÍA ANUAL.....	72
FIGURA 3.20 TENDENCIA LINEAL DE LA DURACIÓN DE LA SEQUÍA MENSUAL	72

FIGURA 3.21 TENDENCIA DE LA CANTIDAD DE CICLOS CON PRECIPITACIÓN \geq 300 MM.	75
FIGURA 3.22 PRECIPITACIÓN \geq 300 MM POR CICLOS DE CUATRO MESES. AÑO 2017.	76
FIGURA 3.23 FECHAS Y MAGNITUD DE LAS PRECIPITACIONES EN EL AÑO 2017.	78
FIGURA 3.24 COMPONENTES QUE FORMAN PARTE DEL DESPLIEGUE DE LA APLICACIÓN.	79
FIGURA 3.25 INTERFAZ PRINCIPAL DE SISTEMA INFO_CLIM.	80
FIGURA 3.26 INTERFAZ DE SELECCIÓN DE LOS MUNICIPIOS INFO_CLIM.	81
FIGURA 3.27 INTERFAZ DE ENTRADA DE LOS DATOS REGISTRADOS EN LOS PLUVIÓMETROS.	82
FIGURA 3.28 INTERFAZ DE DATOS DE PRECIPITACIONES INTRODUCIDOS EN EL SISTEMA INFO_CLIM.	83
FIGURA 3.29 REPORTE DE DATOS DE PRECIPITACIONES DESESTACIONALIZADOS EN EL SISTEMA INFO_CLIM.	83
FIGURA 3.30 REPORTE DE DATOS DE PRECIPITACIONES DESESTACIONALIZADOS EN EL SISTEMA INFO_CLIM.	84
FIGURA 3.31 INTERFAZ DE CREACIÓN DEL CLIMOGRAMA EN EL SISTEMA INFO_CLIM.	85
FIGURA 3.32 REPORTE DE CURVA ACUMULATIVA EN EL SISTEMA INFO_CLIM.	85
FIGURA 3.33 REPORTE DE PATRÓN DE DESPLAZAMIENTO EN EL SISTEMA INFO_CLIM.	86
FIGURA 3.34 REPORTE DE ANOMALÍA EN LAS PRECIPITACIONES EN EL SISTEMA INFO_CLIM.	86

INTRODUCCION

El cambio climático es un problema ambiental de primera magnitud. Los informes del Panel Intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) ponen de manifiesto la necesidad de adoptar medidas de mitigación, adaptación y de proyección sobre el tema. El clima constituye uno de los recursos naturales más apreciados de la Tierra pues posee la propiedad de restablecer constantemente el calor, la humedad, la radiación solar, el viento y otros elementos climáticos. Es, además, un recurso básico del que dependen todos los demás, por lo que cualquier cambio en el mismo repercute sobre la naturaleza y la sociedad (IPCC, 2007).

El cambio climático está referido a la alteración del clima con respecto al historial climático mundial o regional e involucra a diversos parámetros meteorológicos como temperatura, precipitaciones, presión atmosférica, nubosidad, aumento en el nivel del mar y variaciones en la ocurrencia de eventos extremos del clima como sequías, inundaciones y tormentas tropicales. Esto se debe tanto a causas naturales como antropogénicas (Oreskes *et al.*, 2018); sin embargo, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático usa el término "cambio climático" solo para referirse al cambio por causas humanas.

Dichos cambios son el resultado de los desequilibrios energéticos, ecológicos y sociales provocados por los avances tecnológicos de la actualidad, el excesivo crecimiento poblacional y el desarrollo industrial caracterizado por el uso de combustibles fósiles en el consumo de energía (Laguardia, 2020). El cambio climático responde al aumento de gases efecto invernadero (GEI), especialmente

al CO₂. El aumento irrestricto de estas emisiones está subiendo la temperatura del planeta (IFPRI, 2009).

La emisión de gases efecto invernadero generados por un acelerado desarrollo económico asociado al aumento de la población, puede amenazar la sostenibilidad socioambiental en un futuro sumado a los cambios en los patrones de precipitación y temperatura. Esto podría generar un difícil acceso a los recursos naturales, el desplazamiento de la población y otros impactos a nivel social y económico; por esta razón, una de las mayores preocupaciones a nivel mundial es la influencia del calentamiento global y del cambio climático en los diferentes sectores económicos especialmente en los países en vías desarrollo por presentar mayor vulnerabilidad y menor resiliencia en su población (Fernández, 2013).

El Programa Nacional de Cambio Climático por medio del Proyecto “Fomento de Capacidades para la Etapa II de Adaptación al Cambio Climático en Centroamérica, México y Cuba” (ACC II, 2005) afirma que es muy difícil encontrar evidencias de los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos, debido a que, por una parte, los efectos del cambio climático deben ser menores a los errores de las observaciones.

Los efectos del cambio climático constituyen uno de los principales problemas a los que se enfrenta la sociedad. Cada vez son más las evidencias científicas que los constatan, manifestándose a través de algunas variables climáticas. Muchos son los investigadores a nivel internacional y nacional que han realizado investigaciones referentes al cambio climática con temáticas diferentes, ya sea relacionado con el transporte, el sector forestal, los suelos, la actividad agropecuaria o la salud humana, siempre con la identificación de varios indicadores especialmente los de temperaturas y precipitaciones.

El IPCC definió los indicadores mediante los cuales se pueden identificar o encontrar las evidencias del cambio del clima (Paredes, 2022). Unos son indicadores relacionados con la temperatura y otros relacionados con la precipitación pluvial. Los indicadores de cambio climático tienen el objetivo de ser elementos matemáticos que se utilizan para identificar, registrar, conocer y hacer evidente el cambio climático (Hernández *et al.*, 2019; Hernández, 2021).

El indicador Amenaza por Sequía representa la combinación de las condiciones climáticas particulares de cada región y la variabilidad en las precipitaciones. Este indicador se basa en el cálculo de las anomalías con los datos de precipitación mensual y el análisis de la amenaza de sequía a partir de la combinación del comportamiento de dos fenómenos: la Aridez Climática y la probabilidad de ocurrencia de sequías (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, 2002).

La Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, 2007) sostiene que la variabilidad climática ya ejerce impactos en los sectores económicos de varios países; por lo que es importante el abordaje del tema de la variabilidad y el cambio climático para promover el conocimiento sobre el tema, ayudar a identificar opciones de adaptación, fomentar la participación de los tomadores de decisiones como diseñadores, de tal manera que la implementación de los proyectos sea clave para el éxito de éstos.

El cambio climático es cada vez más reconocido como un gran desafío y representa una de las mayores amenazas para el desarrollo y seguridad del ser humano. No es posible predecir exactamente lo que pasaría en las distintas localidades; pero las tendencias apuntan a cambios en los patrones de lluvias y temperaturas, aumento del nivel del mar, derretimiento de glaciares y mayor frecuencia en la ocurrencia de eventos extremos tales como huracanes, sequías y fuegos forestales; lo que impacta en la reducción de la productividad agrícola y las pérdidas de cosechas, que son apenas algunos de los efectos previsibles. Por

esta razón, la adaptación al cambio climático representa para la región de Latinoamérica y el Caribe un punto central en la agenda de desarrollo socio-económico y en los procesos de toma de decisiones (Grünwaldt *et al.*, 2010; González *et al.*, 2013).

Lo antes expuesto confirman que las predicciones climáticas de mediano y largo plazo adquieren cada vez más importancia debido al impacto que los eventos extremos tienen en la actividad socioeconómica de una región (Palacio, 2021). El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP, 2010) considera que los estudios sobre adaptación al cambio climático en el sector hídrico son de gran importancia estratégica debido a los impactos en las actividades económicas. Los recursos hídricos constituyen un sector clave, ya que tiene una función crítica para la generación de energía hidroeléctrica, para la provisión de agua potable y para el riego y el drenaje, por mencionar sólo algunos.

De igual manera la ACC II (2005) asevera que los estudios sobre el cambio climático se orientan a la evaluación de la cantidad y calidad de datos disponibles, de las tendencias del clima y sus efectos en los recursos hídricos, la biodiversidad y en la producción agrícola. Estos estudios deben utilizar la información disponible en los países acerca de los sistemas vulnerables, tales como el sector agrícola y los recursos hídricos, los cuales requieren una evaluación concienzuda y un proceso firme de los actores para la adaptación al cambio climático.

Las tendencias hidroclimáticas se pueden analizar a partir de los registros de temperatura y precipitación. La tendencia de la temperatura y la precipitación se obtiene de la serie de tiempo estandarizada de ambas variables, la cual se determina mediante la división del valor anual entre el valor medio hiperanual, el cual se considera representativo de una localidad (ACC II, 2005).

Se dispone en la actualidad de diferentes herramientas de apoyo en el análisis del cambio climático como es el software para el cálculo de Indicadores con datos diarios, el cual fue realizado en México y permite detectar, dirección, magnitud y sentido del cambio climático a nivel local (ICC, 2016) y el sistema para la alerta temprana de los efectos del cambio climático específicamente en la agricultura desarrollado en Cuba por Sosa *et al.* (2017). Este último describe las zonas de cultivos más vulnerables en cuanto a las condiciones hídricas del suelo y nivel de salinización.

Las tendencias climáticas observadas en todo el Caribe en las últimas décadas indican un aumento en la frecuencia e intensidad de la sequía, vinculadas con el incremento de la variabilidad climática y el cambio climático; por tanto, el conocimiento de este fenómeno en espacio y tiempo es de vital importancia para reducir los riesgos asociados y proveer una alerta temprana que garantice la protección de las personas, la economía y el medioambiente (Centella *et al.*, 1997; Lapinel & Planos, 2002; Cutié y Lapinel, 2013).

Existen estimaciones de la intensidad del cambio climático a partir de diversos datos que permiten conformar el patrón de anomalías climáticas el cual estaría asociado a una estructura de anomalías con centros positivos y negativos. Los escenarios de anomalías se deben calcular utilizando los últimos 30 años de la serie climática analizada (Maenza & Compagnucci, 2010).

Las anomalías climáticas involucradas en el cambio climático generan un impacto socioeconómico de grandes proporciones en el ámbito regional, en donde la agricultura depende del régimen de lluvias y el comportamiento de la temperatura. Estas anomalías ocasionan inundaciones en terrenos cultivados, proliferación de plagas y enfermedades, cambios en los ciclos vegetativos de los cultivos, cambios en los ciclos de plagas, mayor estacionalidad de la producción, pérdidas en la

producción y rendimiento de cultivos, importación de productos agrícolas y amenaza a la seguridad alimentaria entre otros (Fernández, 2013).

Los cambios de los patrones de precipitación son un elemento importante del cambio climático casi inexplorado, los cuales pueden tener una gran cantidad de consecuencias sobre un amplio número de procesos biológicos como la germinación de semillas, el crecimiento de las plantas; así como la composición y dinámica de comunidades y poblaciones (Miranda, 2007).

La cantidad de días con lluvia constituye una temática de estudio en investigaciones de carácter climático asociados a la agricultura y a otras ramas de la economía, que se vincula con el cambio climático. Esta variable resulta de gran interés y beneficio en la planificación y distribución de las fuerzas productivas, en la representación de zonas de importancia para la intensificación de la producción agrícola y el riego; así como en la erosión de los suelos (Trusov *et al.*, 1983; Ordoñez *et al.*, 2008; Durán, 2017; García *et al.*, 2020).

La disminución drástica del recurso agua en el planeta y el cambio climático serán responsables del 20% del incremento de la escasez global de agua, la cual se manifestará en 180 países según su cantidad y calidad; entre los que se encuentran: Kuwait, Gaza, Emiratos Árabes, Bahamas y Qatar que son los de mayores necesidades por disponer de menores reservas de agua potable per cápita (Gallardo, 2015).

Los países en desarrollo y en especial aquellos más pobres, serán los más afectados por los efectos del cambio climático, el cual amenaza con profundizar la vulnerabilidad actual y atenta gravemente contra las perspectivas de desarrollo y el cumplimiento de las Metas de Desarrollo del Milenio (Grünwaldt *et al.*, 2010).

Cuba cuenta con una estrategia para la mitigación y adaptación al cambio climático sustentada en instrumentos para la observación del sistema climático, la educación de la población y la comprensión del problema por parte de los actores a los diferentes niveles (Brown, 2015).

Tomando como referencia investigaciones realizadas por Areces *et al.* (2020) desde el Instituto de Geografía Tropical sobre la incidencia del cambio climático en áreas vulnerables a la desertificación de las tierras en Cuba se observan varios cambios en los cuales el municipio de Venezuela no está excepto como son: incremento de la temperatura superficial del aire en 0,9 °C debido al aumento de la temperatura mínima promedio en 1,9 °C; disminución en la oscilación diurna de la temperatura; aumento de hasta 4 °C de la temperatura media del aire; disminución de la precipitación anual entre el 15 y el 63%; aumento de la evapotranspiración potencial y la evaporación real; incremento significativo de los eventos de sequía y avances de los climas subhúmedos secos desde el oriente hacia el occidente.

El diagnóstico climatológico elaborado en áreas del municipio Venezuela demostró la existencia de comportamientos negativos en los patrones de lluvia y temperatura que constituyen aspectos de vulnerabilidad y favorecen la ocurrencia de cambios climáticos entre los que se encuentran los siguientes: pluviometría de 1180,35 mm, inferior a la norma del municipio de 1248,60 mm, relación entre la precipitación y la evaporación de 0,59 lo que demuestra un déficit hídrico y temperaturas medias anuales de 25,15 °C superiores en 0,15 °C a la media hiperanual de 25,0 °C (Gallardo, 2015).

En este municipio se han presentado problemas de sequías meteorológicas que han provocado impactos severos sobre los recursos de agua, la humedad natural del suelo y el abasto a la población; sin embargo, no se ha demostrado científicamente la vinculación de estos efectos negativos con el cambio climático.

La **situación problémica** de la investigación reside en que las investigaciones previas realizadas en la cuenca Sur de la provincia de Ciego de Ávila han encontrado que en los últimos treinta años las variables precipitación, número de días con lluvias y temperatura media del aire han presentado comportamientos anómalos respecto a su norma, lo que puede asumirse como evidencias de ocurrencia de posibles cambios climáticos; sin embargo, no se han determinado indicadores que permitan corroborar científicamente este comportamiento.

De esta manera el **problema científico** se centra en ¿Cómo contribuir a la reducción de los impactos negativos del cambio climático sobre los recursos hídricos pluviales? para lo cual el **objeto de investigación** son los procesos que originan el cambio climático global y el **campo de acción** los indicadores del cambio climático asociados a los recursos hídricos pluviales.

Las **posibles causas del problema** son: el calentamiento global que provoca impactos negativos en el sistema climático de todos los países del mundo; el aumento observado de la temperatura en el municipio Venezuela; las actividades agrícolas que representan el 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero; las actividades ganaderas que representan el 17% de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a los procesos en la digestión y defecación de animales; el biogás generado por la fermentación en condiciones anaeróbicas de materia orgánica que se encuentra en los estiércoles y en la basura doméstica; la quema de combustibles fósiles en actividades industriales, instalaciones estatales y privadas y el cambio de uso del suelo entre otros.

Sobre la base a los elementos expuestos se formula la **hipótesis** siguiente: si se proponen indicadores para la determinación de evidencias de cambio climático sustentado en el análisis de la variabilidad estacional e interanual de la precipitaciones y la temperatura, la construcción del Climograma local, la determinación de los parámetros de severidad de la sequía meteorológica y el

desarrollo de un software para la estimación mediante indicadores de las evidencias de cambio climático; entonces se podrá contribuir a la reducción de los impactos negativos sobre los recursos hídricos pluviales en el municipio Venezuela de la provincia Ciego de Ávila.

Para contribuir al desarrollo de esta investigación, el presente trabajo tiene como **objetivo general** proponer indicadores para la determinación de evidencias de cambio climático y sus efectos sobre los recursos hídricos pluviales en el municipio de Venezuela de la provincia Ciego de Ávila. Se proponen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Determinar el índice de estacionalidad de las precipitaciones.
2. Construir el Climograma de la localidad.
3. Determinar los parámetros de severidad de la sequía meteorológica con base en el Índice Porcentaje de Precipitación Normal.
4. Evaluar los efectos de la variabilidad climática de la precipitación sobre la producción agrícola.
5. Desarrollar un software para la estimación de indicadores que demuestren evidencias de cambio climático y su validación en el municipio de Venezuela.

La novedad científica está dada en la integración de variables meteorológicas para la determinación de evidencias de cambio climático mediante indicadores que se calculan a través de un novedoso programa informático.

La contribución a la teoría está dada en la propuesta de los siguientes aspectos: la construcción del Climograma local del municipio Venezuela que permite definir con exactitud los periodos de sequias; la integración de diferentes indicadores para la determinación de evidencias de cambio climático en diversos periodos cronológicos; la propuesta de un índice pluvial para la toma de decisiones sobre el

desarrollo de la agricultura de secano y los parámetros de severidad de la sequía meteorológica estimados mediante el Índice Porcentaje de Precipitación Normal.

El aporte práctico de la investigación se manifiesta en el desarrollo del software INFO-CLIM que constituye una herramienta útil para la gestión de indicadores climáticos que permiten determinar la existencia de evidencias de cambio climático en diferentes etapas cronológicas.

Actividad científica del autor

- La investigación se inserta en dos proyectos institucionales “Sistema de alerta temprana a partir de la estimación de las inundaciones aguas abajo de las presas y microcuencas de la provincia Ciego de Ávila” y “Metodología para el aprovechamiento sostenible del agua y la energía en la agricultura y la protección del suelo en sistemas agroproductivos las provincias de Ciego de Ávila y Sancti Spiritus”.
- Los principales resultados de la investigación han sido divulgados a través de los siguientes artículos científicos: Indicadores para la evaluación del cambio climático en el municipio de Venezuela en Ciego de Ávila, Cuba. Revista Universidad y Sociedad (Scopus, nivel máximo) y Herramienta informática para el análisis hídrico de las precipitaciones diarias y extremas en cuencas hidrográficas. Revista Cubana de Ciencias Informáticas (Scielo, nivel medio).
- El autor de la tesis ha participado en los eventos científicos internacionales siguientes: XV Conferencia Científica de Ingeniería Agrícola AGRING 2021 a los 22 días del mes de diciembre del 2021 y XV Convención Científica Internacional UNICA 2022 del 17 al 21 de octubre del 2022.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se exponen los resultados que han dado lugar a la realización de la presente investigación; así como la revisión de los diferentes criterios para la valoración del calentamiento global y los efectos del cambio climático, haciendo una comparación de varios indicadores; los impactos negativos del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales; el índice de estacionalidad de las lluvias; los fundamentos teóricos y metodológicos sobre el fenómeno del cambio climático y finalmente se evalúan las variables que intervienen para determinar la ocurrencia de cambios climáticos.

1.1 Calentamiento global

La certeza de la comunidad científica internacional sobre el calentamiento en el sistema climático es inequívoca, tal y como se subraya en el propio informe.

“Desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado” (IPCC, 2022).

A esta afirmación se relaciona el incremento de la temperatura en la atmósfera y en los océanos con el incremento de los GEI. El informe de este Grupo del IPCC hace referencia también a los estudios que de forma independiente han llevado a cabo científicos de todo el mundo y que verifican estos cambios.

El calentamiento global consiste en el incremento de la temperatura media del planeta, que viene experimentándose desde la implementación de mediciones

rutinarias de este parámetro (Caballero *et al.*, 2007) registrándose un aumento de en torno a 1 °C respecto a la media de la segunda mitad del siglo XIX (Caballero *et al.*, 2007) o hasta de 1,1 °C, según informó en 2019 la ONU, tras el análisis de los datos de la Organización Meteorológica Mundial.

El origen antropogénico de este fenómeno se puede achacar al aumento de la concentración en la atmósfera de los GEI, especialmente de dióxido de carbono ligado fundamentalmente a la deforestación y al consumo de combustibles fósiles como el carbón, petróleo, gas natural, cuyo consumo se vio incrementado enormemente por el desarrollo industrial y de los transportes y en menor medida de metano debido al gran desarrollo de actividades agropecuarias, como el cultivo del arroz o la ganadería y dióxido nitroso uso de fertilizantes, que viene registrándose desde el comienzo de la revolución industrial hasta los día de hoy (Rodríguez & Mance, 2009). Una mayor concentración de GEI en la atmósfera se corresponde a un aumento de la temperatura de la superficie terrestre, al absorberse en la atmósfera una mayor cantidad de radiación solar (Caballero *et al.*, 2007).

Entre algunos de los posibles impactos identificados por el IPCC como consecuencia del cambio climático se pueden citar la alteración de los regímenes pluviométricos regionales volviéndose algunas regiones más secas y otras más lluviosas, de los patrones de vientos, alteración de los climas regionales, de las zonas agrícolas reducción del potencial de producción agroalimentaria, con los posibles efectos de escasez de alimentos asociados, aumento del nivel del mar debido al deshielo de casquetes polares.

La dilatación térmica de los océanos pone en grave riesgo a islas y regiones costeras de baja altitud, en las cuales se concentra una elevada porción de la población mundial; también el aumento de las temperaturas incide en la

propagación de enfermedades por vectores; en la escasez de recursos hídricos y en la desertización de regiones (Feldmann & Biderman, 2001).

1.2 Indicadores del calentamiento global

Los indicadores más utilizados para medir el calentamiento global son principalmente la concentración de GEI y el cambio de la temperatura media; no obstante también se emplean diferentes indicadores climáticos independientes como son: aumento del nivel del mar, del vapor de agua, del calor en el océano, de la temperatura del aire en los niveles más bajos de tropósfera; además del aumento de la temperatura del aire en el mar, de la temperatura superficial del mar y la temperatura sobre tierra, entre otros.

A lo largo de los últimos tres siglos, la humanidad ha elevado notablemente la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera, quemando enormes cantidades de combustible (CITMA, 2011). Las plantas absorben el dióxido de carbono (CO₂) del aire durante la fotosíntesis, por eso, con la tala indiscriminada de los bosques se ha disminuido la capacidad de la naturaleza para eliminar el exceso de CO₂ atmosférico.

1.3 Problemática del cambio climático

Los estudios alrededor del Cambio Climático no son algo novedoso, tal y como lo muestran Fleming (1998) y Weart (2015). Estos autores muestran que desde el siglo XIX ya se venían realizando trabajos alrededor del tema, destacando entre otros los trabajos de Joseph Fourier en 1824 quién encontró que las alteraciones que se presentaban en el clima estaban fundamentadas por cambios en la atmósfera, seguido por John Tyndall en 1859 quien pudo establecer que el dióxido de carbono y el metano eran gases que intervenían en el proceso de elevación de la temperatura y luego Svante Arrhenius en 1896 descubrió que la quema de combustibles fósiles en la tierra generaban dióxido de carbono, el cual influía de manera importante sobre el clima (Fleming, 1998; Weart, 2015).

Desde la revolución científica del siglo XVII y la revolución industrial, iniciada en la segunda mitad del siglo XVIII, el desarrollo de la ciencia y de la tecnología ha permitido un elevado incremento de los estándares económicos, técnicos y de desarrollo humano de buena parte de las sociedades actuales (Vega, 2004).

A partir de dicho momento, de forma paralela al desarrollo económico, aumenta espectacularmente la presión ejercida por el ser humano sobre el medio ambiente, en términos de explotación de recursos naturales a modo de materias primas o de fuentes de energía (como los combustibles fósiles), explotación de superficie terrestre, y de emisión de cargas ambientales (entre ellas, emisión de dióxido de carbono y otros GEI a la atmósfera. Todo esto, se ve acompañado de un gran incremento de la población mundial (Vega, 2004).

Esta visión sólo comienza a modificarse a partir de los años 60. En el informe del club de Roma de 1968 se plantearon los problemas socio-ambientales que ponían en riesgo el futuro de la humanidad, así como el deterioro del medio ambiente. Entre estos se encontraba la explosión demográfica, la macro contaminación o el uso incontrolado de la energía, entre otros. En 1992 se celebró la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, también conocida como Cumbre de la Tierra, ratificando los acuerdos de los eventos anteriores, instituyendo la Convención Marco sobre el Cambio Climático (Zabala & García, 2008).

El cambio climático es una problemática que afecta de forma generalizada a todos los que habitan en el planeta tierra; por eso el ser humano tiene la responsabilidad de reducir el deterioro ambiental provocado por las grandes cantidades de dióxido de carbono emitidos por los animales y los procesos de transformación de los materiales de la industria, que originan muchos de los gases quedan atrapados en la atmósfera de la tierra (Hernández, 2021).

1.4 Definiciones de cambio climático

En cuanto al concepto de Cambio Climático, según Burroughs (2007) existen diferentes acepciones, una de estas es que entre los conceptos de variabilidad climática y Cambio Climático no se tiene clara la diferencia. El primero hace referencia a alteraciones alrededor del promedio del valor que tome la variable climática que se establezca como referencia (temperatura, por ejemplo) a través del tiempo, o sea, que siempre va a existir, mientras que el segundo denota que para que exista Cambio Climático la variable climática utilizada debe presentar un comportamiento no estacionario, donde las fluctuaciones que se dan en la variable no tienen una media constante.

Los científicos definen al cambio climático como todo cambio que ocurre en el clima a través del tiempo, resultado de la variabilidad natural o de las actividades humanas. El calentamiento global, por su parte, es la manifestación más evidente del cambio climático y se refiere al incremento promedio de las temperaturas terrestres y marinas globales (Semarnat, 2009).

Del Valle (2014) asume el concepto dictado en la Conferencia de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas en Río de Janeiro en 1992 donde se adoptó, en el seno de la Convención Marco sobre Cambio Climático, que es el cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

En particular Bolaños (2017), plantea que el cambio climático, es un fenómeno de origen antropogénico, el cual constituye uno de los problemas ambientales más graves a afrontar por parte de la humanidad, cuya minimización depende de la implicación e intervención de todos los miembros de la sociedad.

A partir de aquí el autor asume que el cambio climático es un fenómeno que consiste en el incremento de la temperatura media superficial debido al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero. Este es un fenómeno con el potencial de provocar efectos como la alteración de los regímenes de lluvia y de vientos, de climas regionales, deshielo de polos y aumento del nivel del mar, inundaciones severas de islas y zonas costeras, aumento de determinadas enfermedades y escasez de recursos hídricos.

1.5 El clima en el cambio climático

El clima puede definirse como el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas y meteorológicas, caracterizado por el estado de las mismas y su evolución temporal en un determinado ámbito espacial, a definir según cuál sea el ámbito geográfico considerado (Del Valle, 2014). El sistema climático es complejo, estando integrado por atmósfera, hidrosfera, geosfera, biosfera, y las interacciones entre dichos elementos y los ecosistemas en que habitan seres vivos (Useros, 2013).

El clima no es un elemento puntual y estático, sino que se estudia en términos de media y de variabilidad (Ritter *et al.*, 2002; Useros, 2013), además de constar de numerosos parámetros diferentes, siendo la temperatura una de ellas (Ritter *et al.*, 2002). Evoluciona, en espacios geográficos determinados, en el tiempo en función de distintos factores, como la latitud, la altitud, la distancia al mar, la localización de la superficie terrestre con respecto al sol, la dirección e intensidad de los vientos y de las corrientes oceánicas (Useros, 2013).

El clima de Cuba es predominantemente tropical, con influencia de la zona de altas presiones del Atlántico Norte y por los vientos del noreste en invierno y este-noreste en el verano. Las corrientes templadas de la corriente del Golfo tienen una influencia moderadora en el clima (FAO, 2015).

1.6 El efecto invernadero

El efecto invernadero es el fenómeno consistente en el calentamiento de la atmósfera terrestre mediante la citada absorción de radiación solar por parte de los GEI (Caballero *et al.*, 2007). Dichos gases se encuentran en concentración muy minoritaria en la atmósfera, compuesta de forma mayoritaria por un 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno, un 0,9% de argón, y otros gases, entre ellos varios GEI, en porcentajes menores (Caballero *et al.*, 2007; Useros, 2013).

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) enumera como GEI primarios el dióxido de carbono (CO₂), el vapor de agua (H₂O), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃), contemplándose además los compuestos fluoro carbonados y otras sustancias que contienen cloro o bromo (según lo contemplado en el Protocolo de Montreal de 1987, para la protección de la capa de ozono y según lo dispuesto en el Protocolo de Kyoto de 1997 para la limitación de emisión de GEI ,el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).

1.7 Recursos Hídricos en Cuba

La República de Cuba se asienta en un archipiélago compuesto por una isla de mayor tamaño, Isla de Cuba (104 556 km²), una isla mediana, Isla de la Juventud (2 204 km²), y numerosos cayos adyacentes (3 126 km²) que se agrupan alrededor de la isla grande formando clústeres insulares como son los Jardines del Rey, los Jardines de la Reina, Los Canarreos y Los Colorados (Duque, 2018).

La hidrografía de la Isla de Cuba está caracterizada por la existencia de un parte aguas ubicado en el centro y a lo largo de la isla que divide al territorio en dos vertientes, la Norte y la Sur, de donde corren numerosos ríos, cortos y de poco caudal (alimentación pluvial), destacando entre ellos el río Cauto (el más largo con 343 km, en la región oriental y el único que escurre en dirección oeste-este). En la isla de la Juventud la hidrografía es radial y solo se destaca el río las Casas, el

cual al igual que la mayor parte de los ríos de la Isla de Cuba se encuentra represado (FAO, 2015).

En el Foro Mundial del Agua que tuvo lugar en Bergkamp, en marzo del 2009, se planteó que “mientras la población mundial se triplicó durante el siglo XX la demanda de agua creció en 6 veces”, de igual manera se señala que los países o regiones del planeta que estén por debajo de 2000 m³/hab/año se deben considerar en crisis hídrica. El área del Caribe es relativamente pobre en recursos hídricos comparativamente con el resto de nuestra América, y dentro del Caribe se encuentra Cuba (González *et al.*, 2019).

El tema relacionado con el futuro a mediano y largo plazo de los recursos hídricos cubanos es complejo, ya que realmente existe incertidumbre de cómo se comportarán las lluvias dentro de 20, 50, o 100 años, a pesar de los pronósticos que se dan para la región del Caribe por los diferentes especialistas en Cambio Climático, lo verdaderamente cierto es que un pronóstico no es más que eso un pronóstico, por tanto, nadie puede asegurar que pasará en el futuro.

Como promedio, las precipitaciones históricas anuales se encuentran en los 1 335 mm, concentradas en un 80% en la estación lluviosa de mayo a octubre, y con una tendencia decreciente en las últimas cuatro décadas. En el nordeste de la región oriental y en las zonas montañosas estas características varían y durante los meses de noviembre a abril se producen grandes totales de lluvia. Es precisamente en esa zona del país donde se localizan las áreas con mayor pluviosidad, con valores por encima de los 3 000 mm al año; sin embargo, en el litoral sur de las provincias de Guantánamo y Santiago de Cuba se reportan 600 mm y menos, con condiciones de aridez (Duque, 2018).

El Instituto de Meteorología de Cuba, encargado a nivel nacional del estudio del Cambio Climático dio a conocer en su Segunda Comunicación Nacional a la

Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático un balance hídrico para tres periodos, el primero tomado como línea base que va desde 1961 hasta 1990, el segundo en el 2050 y el tercero en el 2100 (INSMET, 2015). Para ello se valió de las observaciones reales de la lluvia anual en el primer caso, mientras se apoyó en dos modelos matemáticos (ECHAM4 y HadAM3P) para los años 2050 y 2100 y según escenarios SRES A2 (González *et al.*, 2019).

Los eventos hidrometeorológicos extremos más importantes en Cuba lo constituyen los ciclones tropicales y las sequías, los que provocan grandes pérdidas materiales y económicas. Los mayores volúmenes de lluvia están asociados con algunos de los fenómenos meteorológicos más significativos (ciclones tropicales, frentes fríos, ondas tropicales) o tienen su origen en el calentamiento diurno, ocurriendo casi siempre en horas de la tarde en forma de episodios de corta duración. En presencia de sistemas meteorológicos de gran escala pueden producirse períodos de grandes lluvias, sobre todo en los meses de mayo - junio y septiembre – octubre (Duque, 2018).

1.8 Impactos de los Recursos Hídricos superficiales

En el territorio cubano, la única fuente de alimentación hídrica está constituida por las precipitaciones pluviales (Blanco, 2021). El Cambio Climático tiene en consecuencia, una influencia directa y de suma importancia sobre los Recursos Hídricos. Los impactos sobre estos recursos se manifestarán no solo en la variación de la cantidad sino también en la alteración de la calidad y en su distribución temporal.

En la estimación de los recursos hídricos a consecuencia del posible cambio climático existen incertidumbres inherentes tanto a los datos de base, como al proceso de generación de recursos, siendo los primeros de mayor importancia relativa.

Se destacan entre estas incertidumbres los escenarios previsibles, la distribución espacial y temporal de la precipitación, el comportamiento del uso y cubierta del suelo, la recarga de acuíferos y las limitaciones de los modelos de simulación. Los recursos hídricos disponibles por la humanidad provienen de un desequilibrio en los continentes, entre el agua de precipitación y la que se evapora o evapotranspira (Batista, 2019).

Este propio autor informa que los cambios en las precipitaciones condicionan directamente el agua que cae sobre los continentes y los cambios en las temperaturas modifican los valores de evapotranspiración quedando alterada la cantidad y característica de las escorrentías. En este sentido la disminución de los recursos hídricos incide en un gran número de sectores, cuya regulación se lleva a cabo mediante la definición de políticas concretas como la remodelación y redefinición de la actividad científica tecnológica, hidráulica, energética, agrícola, medioambiental y planificación del territorio.

1.9 Precipitaciones

Según Sánchez (2005) se le denomina precipitación a cualquier agua meteorológica recogida sobre la superficie terrestre, las cuales incluyen la lluvia, la nieve, el granizo, el rocío y la escarcha. Se distinguen varios tipos según su origen:

1. Ciclónicas, provocadas por los frentes asociados a una borrasca o ciclón.
2. Convencional, provocadas por el ascenso de masa de aire húmedo y caliente (tormentas de verano).
3. Orográficas, son originadas cuando una masa de aire húmedo es obligada a ascender al encontrar una barrera montañosa.

El propio autor comenta que el estudio de las precipitaciones es básico dentro de cualquier estudio hidrológico regional, para cuantificar los recursos hídricos, ya que constituyen la principal entrada de agua de una cuenca, también son

importantes para el diseño de obras, previsión de avenidas, estudios de erosión etc.

Las precipitaciones son una parte importante del ciclo hidrológico, responsable del depósito de agua dulce y la vida en el planeta. Esta es generada por las nubes, cuando alcanzan un punto de saturación tal que las gotas de agua aumentan de tamaño hasta lograr el punto en que se precipitan por la fuerza de gravedad. Es posible insembrar nubes para inducir la precipitación rociando un polvo fino o un químico apropiado (como el nitrato de plata) dentro de la nube, acelerando la formación de gotas de agua e incrementando la probabilidad de precipitación, aunque estas pruebas no han sido satisfactorias prácticamente en ningún caso (Romero, 2012).

1.10 Temperatura

Desde hace miles de millones de años la Tierra ha experimentado un cambio en su temperatura, por lo que han existido varios períodos en la historia donde ha sido afectada por una dramática baja de la temperatura. Existe evidencia tanto de mayores y menores eras glaciares en los pasados mil millones de años como también de períodos más cálidos. Hace solo algunas décadas se registró durante los últimos 150 años cambios climáticos; estas variaciones se relacionan con la actividad en la superficie del sol, también relacionadas con cambios periódicos de la presión alta o baja en la atmósfera sobre el Atlántico Norte (Bates *et al.*, 2008).

1.11 Variabilidad estacional

El estudio de las variaciones de una variable en el tiempo responde a la descripción del comportamiento de la variable en cuestión, teniendo en cuenta el aumento o descenso y su comportamiento en un tiempo determinado, lo que nos lleva a predecir el comportamiento futuro de la variable de mantenerse relativamente constante el escenario (Chitarroni, 2002).

La estacionalidad o variación estacional de una serie temporal es la variación periódica y predecible de la misma con un periodo inferior o igual a un año. La variación de los recursos hídricos a consecuencia del cambio climático está condicionada por la influencia de otros sectores también afectados por el cambio climático. A su vez los cambios que se producen en los recursos hídricos afectan a muchos otros sectores de una forma importante, siendo clara y notable en los ecosistemas acuáticos y continentales, en la biodiversidad animal y vegetal, en los sectores agrícola, forestal, energético y turístico, en la salud humana y en los riesgos naturales de origen climático (Iglesias *et al.*, 2019).

El clima presenta fluctuaciones a escalas relativamente cortas que es lo que se conoce como variabilidad climática, la cual está asociada con el registro de datos por encima o por debajo de las normales climatológicas. La diferencia registrada entre la variable analizada con respecto a la normal climatológica se conoce como anomalía (Montealegre, 2009). La determinación de la variabilidad climática se logra mediante la determinación de las anomalías, las cuales se hacen evidentes cuando los valores de las variables climatológicas (temperatura, presión atmosférica, humedad, precipitación, etc.) fluctúan por encima o por debajo de sus valores promedios.

El clima exhibe importantes variaciones que pueden ocurrir de un mes a otro, de un año a otro o bien en escalas temporales más largas, como ser de una década a otra; en general se puede definir como variabilidad climática la diferencia de temperaturas y precipitación, entre otras que difieren de algún estado promedio, ya sea por encima o por debajo de ese valor. Ejemplo de estas variabilidades son las inundaciones, sequías, etc. (González *et al.*, 2020).

La herramienta más importante para explorar la posible evolución futura del clima a escala global, conforme a escenarios de cambio de las concentraciones de gases de efecto invernadero, son los Modelos de Circulación General del Océano

y la Atmosfera (GCM), estos desarrollan complicados modelos numéricos que simulan matemáticamente el comportamiento de los diferentes elementos del sistema climático (Bosque & Oñate, 2011).

1.12 Modelos Climáticos

La evidencia disponible muestra que el cambio climático es un fenómeno con incidencia global donde existe un intenso debate sobre sus causas y consecuencias. Existe una gran diversidad de métodos y enfoques para analizar las causas y los efectos socioeconómicas del cambio climático los cuales se basan en comparar las trayectorias de las distintas variables de interés en un escenario inercial o línea base que refleja la evolución de los sistemas ambientales, económicos y sociales en ausencia del cambio climático; por ello, es necesario la construcción de escenarios de largo plazo (Galindo *et al.*, 2014). Esto indica que para lograr este comportamiento en escenario futuro es de gran importancia la utilización de los modelos climáticos.

Generalmente, los modelos científicos son instrumentos que nos ayudan a trabajar con problemas complicados y a entender sistemas complejos. Ellos permiten probar teorías y encontrar soluciones a diferentes escollos. Por esa razón se puede afirmar que los modelos se utilizan de forma casi permanente para explorar y entender cómo funcionan las cosas. Comúnmente al uso de los modelos se le denomina modelación (Centella, 2019).

Los modelos climáticos y meteorológicos aplican a la atmósfera las ecuaciones del movimiento de fluidos, de la física y de la química. Si estas simulaciones se realizan durante un período prolongado, pueden estimarse tanto el estado promedio del sistema como su variabilidad intrínseca (el clima). Puesto que deben resolverse numerosas ecuaciones en un gran número de puntos durante un período prolongado, estos modelos se elaboran en programas informáticos que se ejecutan en computadoras de alto rendimiento (Grünwaldt *et al.*, 2010).

Los modelos matemáticos permiten conocer los probables efectos que el cambio climático puede tener a futuro sobre una región o una zona y contribuye a la planeación de inversión de recursos en aquellos aspectos que tienen mayor vulnerabilidad al cambio y para la definición de planes de mitigación del riesgo y de las consecuencias que pueda traer consigo los cambios en el clima (Oviedo, 2010).

1.13 Tendencias del Cambio Climático

A menudo, las poblaciones de escasos recursos dependen de actividades económicas que son sensibles al clima, por ejemplo, las actividades agropecuarias y forestales dependen del estado del tiempo local y de las condiciones climáticas; un cambio en estas condiciones podría incidir directamente en los niveles de productividad y disminuir los modos de sustento (USAID, 2007).

América Latina constituye una comunidad de naciones donde el cambio climático se ha desatado con fuerza en las últimas tres décadas, el número de latinoamericanos afectados por desastres naturales aumentó ocho veces en los últimos 30 años, lo que muestra la creciente vulnerabilidad de la región ante estos procesos. El número de personas afectadas por las temperaturas extremas, (incendios forestales, sequías, tormentas e inundaciones) pasó de cinco millones en la década de los 70 a más de 40 millones en los 90 (Juventud Rebelde, 2017).

Para México se prevé el aumento de las temperaturas de 3 a 4 °C en el noroeste del país, reduciéndose ligeramente hacia el sur-sureste, donde el incremento sería de poco más de 2 °C. La precipitación podría ser más intensa, o por lo contrario, reducirse en toda la República –dependiendo del modelo de simulación que se utilice- pero lo que sí es claro, es que las implicaciones de estas diferencias, en términos de vulnerabilidad serían negativas (Estrada, 2001).

Las enfermedades tropicales como el “Paludismo” podrían expandirse al hacerlo las zonas en que las condiciones climáticas son adecuadas para la vida del mosquito transmisor. Un aumento de las temperaturas de 2 °C pondría en peligro 210 millones de personas (Parry *et al.*, 2007). Se pronostica que para el año 2100 algunos ecosistemas (manglares, pantanos, arrecifes y otros) resultarán especialmente afectados por el cambio climático en diferentes regiones, como las costas bajas en los trópicos y algunas islas pequeñas. Sus efectos pueden aumentar debido a una mayor frecuencia de fenómenos como ciclones tropicales, sequías y crecidas (CITMA, 2011).

Desde hace poco más de 15 años empezaron a publicarse abundantes estudios sobre las posibles respuestas de los ecosistemas al cambio climático. Las respuestas de los organismos y de ecosistemas al cambio climático son tan variadas y complejas como los ecosistemas mismos. Cada especie responde de manera particular y sus respuestas afectan a su vez al resto de los componentes de los ecosistemas (González *et al.*, 2003).

El cambio climático da lugar a fenómenos meteorológicos extremos, tales como tempestades, inundaciones, sequías y olas de calor. En la última década, ha habido en el mundo tres veces más catástrofes naturales de origen meteorológico que en los años sesenta. Estas catástrofes no solo producen grandes daños, sino que aumentan el costo de los seguros (Parry *et al.*, 2007).

Al calentarse el clima, la evaporación podría incrementarse y podría existir un aumento en las precipitaciones media global y en la frecuencia de lluvias intensas. Sin embargo, mientras algunas áreas podrían experimentar mayores precipitaciones, otras tendrían una reducción de las mismas (Estrada, 2001).

Algunas especies vegetales y animales podrán adaptarse a las nuevas condiciones, incluso algunas de distribución restringida podrán ampliar su hábitat.

Pero en general entre el 20 y el 30 % de la biodiversidad global estará en riesgo de extinción por la pérdida de su hábitat. Por ejemplo, con un incremento de 2°C en temperatura y una disminución de 10% en la precipitación pluvial anual se estima que los tipos de vegetación más afectados en México serán los bosques de coníferas y encinos, seguidos del matorral xerófilo, el bosque mesófilo de montaña, la vegetación acuática y el pastizal; mientras que los tipos de vegetación que aumentarán su superficie respecto a la actual, son el bosque tropical perennifolio, el bosque tropical caducifolio y el bosque espinoso (Santiago *et al.*, 2008).

La regeneración natural de los bosques de manglar sufriría un impacto muy notorio por efectos del cambio climático, debido a la inundación permanente de llanos intermareales, donde los propágulos no podrían asentarse para continuar con su ciclo de desarrollo. Este efecto sería magnificado, ya que, generalmente estos llanos se encuentran en los bordes de camaroneras, lo que impediría, además, el retroceso de los manglares como respuesta a una adaptación natural (González, 2018).

Etiopía presenta un buen ejemplo de los daños ocasionados por el cambio climático con respecto a la economía de un país en vías de desarrollo. El PIB de Etiopía experimenta fluctuaciones alrededor de un año después de los cambios en la precipitación anual. Siendo la agricultura, fuente de la mitad del PIB y del 80 % de los empleos, la economía etíope es sensible a la variabilidad climática, sobre todo a las variaciones en la precipitación (USAID, 2007).

1.14 Herramientas de computó para el cálculo de indicadores

Figura 1.1 muestra la interfaz principal del sistema RClimDEX.8, desarrollado en R, para vista de escritorio, proporciona una interfaz gráfica de usuario amigable para calcular los 27 índices básicos de cambio climático (Herrera, 2014). También lleva un cabo de control de calidad simple en los datos diarios de entrada. El

mismo no permite la caracterización del clima y definir los patrones de desplazamiento ni la curva acumulativa.

Otro sistema encontrado durante la investigación es el software ClimPACT v1.8 (Figura 1.2), el mismo presenta una versión de escritorio y otra versión web. *ClimPact* que le permite calcular índices estadísticos anuales o mensuales de datos climáticos modelados u observados. El cálculo de los índices de *ClimPact* a partir de datos cuadrículados solo se puede realizar en una computadora local. Los índices mínimos/máximo indican el mínimo o máximo de alguna variable en una frecuencia establecida. El sistema calcula la precipitación máxima diaria de cada año, el valor mínimo de las temperaturas máximas diarias de cada mes y el número de días por encima o por debajo de un cierto umbral, entre otros.

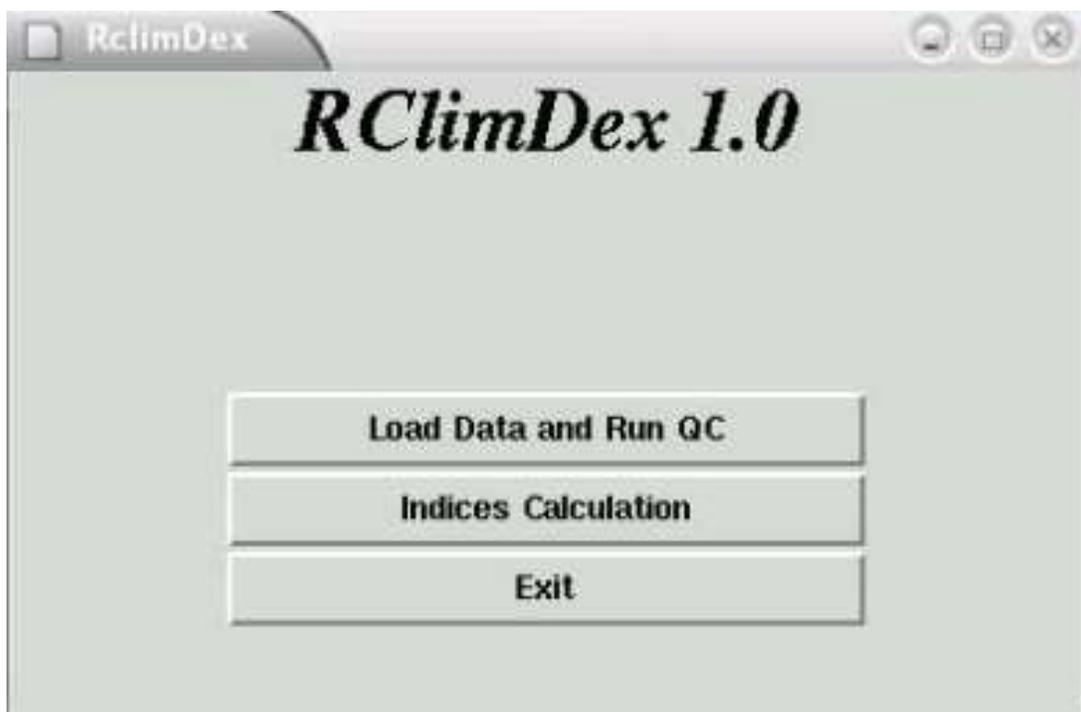


Figura 1.1 Interfaz Principal del sistema RClimDex v1.0.



Figura 1.2 Interfaz Principal del sistema Climapacto v1.8.

Ninguno de estos sistemas permite exportar datos a formato *.xls, realizar análisis de homogeneidad de datos (temperatura máxima, media, mínima y de precipitación), presentar los análisis de anomalías y eventos extremos anuales y mensuales, conocer los índices agroclimáticos para diversos cultivos, revisar las temperaturas de forma gráfica y tabular; así como presentar una interfaz para modificar los datos capturados.

1.15 Conclusiones parciales del capítulo

- Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, no solo dependen de las alteraciones naturales que ocurren en el ciclo hidrológico; sino de la intervención de los seres humanos que modifican sensiblemente el sistema climático del planeta Tierra y producen un desequilibrio energético que es la causa del efecto invernadero antrópico.

- Las herramientas existentes demuestran algunas insuficiencias como la no realización de análisis de homogeneidad de datos a la serie de precipitación, lo cual es imprescindible por ser esta una variable altamente aleatoria desde el punto de vista temporal y espacial.
- No se maneja de manera integral indicadores de gran utilidad para demostrar evidencias de cambios climáticos como los análisis de tendencia, las anomalías climáticas, patrones de desplazamiento, curva sumaria, índice de sequía meteorológica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se exponen los materiales y métodos fundamentales utilizados en la investigación. Se enfatizan en los métodos para la desestacionalización de la serie temporal de precipitaciones, la construcción del climograma de Gausse, la estimación de evidencias de cambio climático, el cálculo de la probabilidad empírica y teórica de las precipitaciones, la caracterización de la sequía meteorológica y los Impactos de la investigación en la producción agrícola.

2.1 Localización del área de estudio

La investigación se desarrolló en el municipio de Venezuela de la provincia de Ciego de Ávila, situado hacia el Sur de esta provincia a los 21° 42' latitud Norte y los 78° 48' longitud Oeste. Limita al norte, con el municipio de Ciego de Ávila; al este, con el municipio de Baraguá; al sur, con el golfo de Ana María y al oeste, con el municipio de Majagua (Figura 2.1).

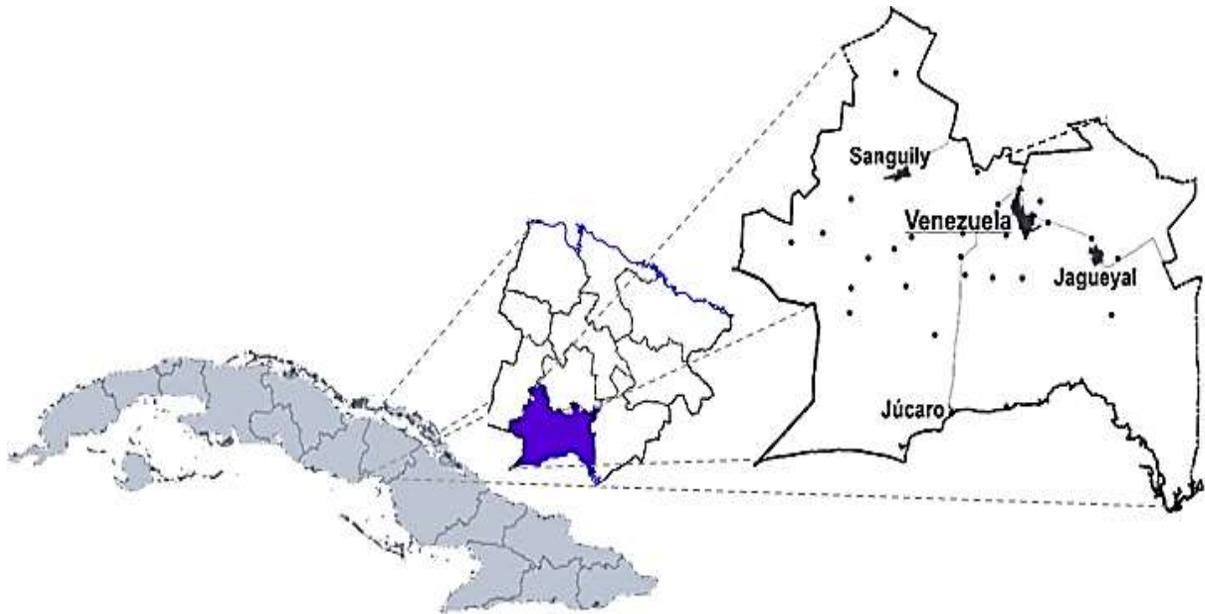


Figura 2.1 Localización de municipio Venezuela en Ciego de Ávila.

El municipio de Venezuela se caracteriza por tener en las zonas centrales áreas de pastos, de cultivo de la caña y de cultivos varios, destacándose los vastos sembrados de plátanos. El litoral marino está ocupado por manglares, que constituyen una gran riqueza para la conservación de los recursos pesqueros, de ahí que tiene una de las más destacadas empresas pesqueras, llamada Ramón Domínguez de la Peña. Los Jardines de la Reina es una cayería que se localiza en la costa sur de la provincia, y que pertenece al Archipiélago de los Canarreos, se espera que en un futuro sea un motor económico como polo turístico cercano a este municipio de Venezuela (Cuba Tesoro, 2022).

2.2 Condiciones climáticas, edáficas y orográficas

El clima en el municipio de Venezuela determinado a partir del análisis de una base de datos de 30 años de observaciones sistemáticas, es similar al del territorio nacional donde se distinguen dos períodos fundamentales en el ciclo hidrológico (húmedo-seco), donde el 81,4% de las precipitaciones se producen en el período húmedo comprendido de mayo a octubre y el 18,6% en el período seco definido de noviembre hasta abril (Gómez, 2016).

El relieve correspondiente al área de estudio es predominantemente llano y se encuentra enmarcado en la llanura Júcaro-Morón, donde la pendiente promedio es de 0,10% y la altitud media es de 25,0 msnm (Gallardo, 2015).

Según Blanco (2021), en el municipio predominan los suelos Ferralíticos Rojos y Ferralíticos Amarillentos (*Ferralsoles*); aunque en menor grado se encuentran los aluviales (*Fluvisoles*) y los hidromórficos (*Gleysoles*). La clasificación internacional utilizada para correlacionar los suelos de Cuba con el contexto internacional fue la *World Reference Base for Soil Resources*, WRB según la *International Union of Soil Sciences* (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

2.3 Tipo de investigación

La investigación realizada es del tipo cuantitativa, aplicada y explicativa (Hernández *et al.*, 2006; Blanco, 2021). Es cuantitativa según el enfoque, por asignar valores numéricos a las variables estudiadas; es aplicada según el nivel teórico por responder a un proyecto I+D con el propósito de determinar indicadores de cambio climático y es explicativa según el alcance de la investigación por explicar las causas que provocan las variaciones estacionales e hiperanual de las variables estudiadas en el municipio Venezuela de la provincia Ciego de Ávila.

2.4 Variables analizadas

En la investigación se analizó una serie de 30 años de datos correspondiente a cuatro variables meteorológicas: precipitaciones, temperatura, número de días con lluvia y humedad relativa en el periodo comprendido desde 1990 al 2020. Los datos fueron obtenidos de forma sistemática de la estación meteorológica del municipio Venezuela en la provincia de Ciego de Ávila, situada a una altitud de 26,39 msnm.

2.5 Desestacionalización de la serie temporal de precipitaciones

En la práctica existen muchos procedimientos para desestacionalizar una serie de tiempo. En esta investigación se aplicaron las siguientes: el método de los promedios móviles, el método de suavización exponencial y el método de los promedios mensuales.

2.5.1 Método de los promedios móviles

El método de los promedios móviles es un método de suavización y pronóstico, que se basa según García (2010) en sustituir cada dato de la serie temporal de precipitaciones por una media de los últimos tres valores más recientes de la serie; lográndose su suavización y la eliminación del ruido. Se utilizó una media móvil de orden 3 (longitud de 3 períodos), la cual se escribe como:

$$P_{sim(i)} = \sum_{i=1}^3 \frac{P_{i-1} + P_i + P_{i+1}}{3} \quad (2.1)$$

Donde:

$P_{sim(i)}$: valor de la precipitación simulada para cualquier período futuro (mm).

P_{i-1} : valor real de la precipitación para el período anterior (mm).

P_i : valor real de la precipitación para el período actual (mm).

P_{i+1} : valor real de la precipitación para el período siguiente (mm).

2.5.2 Método de suavización exponencial

El método de suavización exponencial consiste según Ruiz (2018) en sustituir cada dato de la serie temporal de precipitaciones por una media ponderada, dándole un mayor peso a los valores más recientes. Este método muestra su mayor eficacia cuando los componentes (tendencia y variación estacional) de las series de tiempo podrían manifestar cambios en el tiempo. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$P_{sim(i)} = \alpha \cdot P_{real(i-1)} + (1 - \alpha)P_{sim(i-1)} \quad (2.2)$$

Donde:

$P_{sim(i)}$: valor de la precipitación simulada para cualquier período futuro (mm).

α : constante de suavización (0-1), obtenida experimentalmente mediante.

$P_{real(i-1)}$: valor real de la precipitación para el período de tiempo (mm).

$P_{sim(i-1)}$: valor de precipitación simulado previamente para el mismo período (mm).

2.5.3 Método de los promedios mensuales

El método de los promedios mensuales permite según Lobos & Muñoz (2005) obtener los Índices Estacionales como paso fundamental para lograr una serie

desestacionalizada o ajustada estacionalmente. En este método se aplicaron los pasos siguientes:

- a) Determinar la precipitación total del mes, mediante la suma de las precipitaciones diarias hasta llegar al total de registro de precipitación diaria en el mes analizado. Se utilizó la ecuación siguiente:

$$Pt_m = \sum_{i=1}^{dm} P_d \quad (2.3)$$

Donde

Pt_m : precipitación total del mes (mm).

P_d : precipitación diaria (mm).

dm : días del mes.

- b) Determinar la precipitación total del año.

$$Pt_a = \sum_{i=1}^{12} Pt_m \quad (2.4)$$

Donde:

Pt_a : precipitación total del año (mm).

Pt_m : precipitación total del mes (mm).

- c) Calcular la precipitación media mensual hiperanual.

$$Pm_m = \frac{\sum_{i=1}^N Pt_m}{N} \quad (2.5)$$

Donde:

Pm_m : precipitación media mensual hiperanual (mm).

N : cantidad de años de la serie temporal.

Pt_m : precipitaciones totales del mes (mm).

d) Calcular la precipitación media mensual corregida.

$$P_{corr} = Pm_m + i \left(\frac{-b}{s} \right) \quad (2.6)$$

Donde:

P_{corr} : precipitación media mensual corregida (mm).

Pm_m : precipitación media mensual hiperanual (mm).

i : contador.

s : período estacional (12 meses).

b : tendencia de la serie, expresada mediante el valor de su pendiente lineal.

e) Determinar el Índice Estacional del mes

$$IE_{mes} = \frac{P_{corr}}{Pm_m} \quad (2.7)$$

Donde:

IE_{mes} : Índice Estacional del mes.

P_{corr} : precipitación media mensual corregida (mm).

Pm_m : precipitación media mensual hiperanual (mm).

f) Determinar el valor de la precipitación desestacionalizada de la serie temporal.

$$P_{des} = Pt_m * IE_{mes} \quad (2.8)$$

Donde:

P_{des} : valor de la precipitación desestacionalizada de la serie temporal (mm).

P_{tm} : precipitación total del mes (mm).

IE_{mes} : Índice Estacional del mes.

g) Validar la precisión del método de desestacionalización

La validación de la precisión del método de desestacionalización de la serie temporal de lluvia se realizó según Gan *et al.* (2008), mediante la comparación de la precisión entre los métodos de desestacionalización de los promedios móviles y la suavización exponencial respecto a los datos reales con la utilización del Error Porcentual Medio, el cual se calculó como:

$$EPM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(Y_{obs} - Y_{sim})^2}{Y_{obs}} 100 \quad (2.9)$$

Donde:

EMP : Error Porcentual Medio (%).

Y_{obs} : precipitación real (mm).

Y_{sim} : precipitación simulada (mm).

N : cantidad de años de la serie temporal.

2.6 Estadígrafos fundamentales de las precipitaciones

Se aplicó la técnica de estadística descriptiva para analizar los estadígrafos fundamentales de la serie de precipitaciones anuales. Los estadígrafos estimados fueron: media aritmética, error típico, mediana, moda, desviación estándar (σ), curtosis, coeficiente de asimetría, rango, valor máximo, valor mínimo y coeficiente de variación (C_v).

2.7 Construcción del climograma de Gausen

Se construyó el climograma de Gausen (Martínez, 2013) para conocer el ambiente climático del municipio de Venezuela a partir de la síntesis de las

características principales del clima en la localidad con base en el promedio de las variables temperatura y precipitación. En este proceso se estimó el índice de aridez (IA) para los meses en que los valores de las precipitaciones quedan por debajo de los de las temperaturas (Camarasa, 2009). El índice de aridez se presenta cuando el doble de la temperatura media es igual o superior a las precipitaciones, lo cual es visible en un gráfico construido siguiendo este criterio. La expresión utilizada fue la siguiente:

$$IA = 2T_m \geq P_m \quad (2.10)$$

Si P_m (mm) \leq IA: se presenta un mes seco.

Si P_m (mm) \geq IA: se presenta un mes no seco.

Dónde:

IA: Índice de Aridez.

T_m : temperatura media mensual (°C).

P_m : precipitación (mm).

La temperatura media del mes durante el periodo estudiado se calculó mediante el método de la media aritmética (Rondero, 2010). La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$T_{Mm} = \frac{\sum_{i=1}^n T_m}{12} \quad (2.11)$$

Donde

T_{Mm} : temperatura media mensual (°C).

T_m : temperatura mensual (°C)

n : número de años estudiados.

El climograma construido en esta localidad permitió la identificación de los meses secos, los cuales se clasificaron en cinco categorías determinadas estadísticamente a través del método de los quintiles (Arias *et al.*, 2020; Robayo, 2020).

La oscilación térmica anual se determinó mediante la diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la temperatura media del mes más frío (Alexandre *et al.*, 2013) como muestra la expresión siguiente:

$$OT = T_{cal} - T_{fr} \quad (2.12)$$

Dónde:

OT : oscilación térmica anual (°C).

T_{cal} : temperatura media del mes más cálido (°C).

T_{fr} : temperatura media del mes más frío (°C).

2.8 Evidencias de cambio climático

Las evidencias de cambio climático se estimaron a partir de cinco indicadores: variabilidad interanual, tendencia lineal, curva sumaria, patrón de desplazamiento y anomalías. El análisis del comportamiento de las variables involucradas en estos indicadores sustentada según Chávez (2018) en sus variaciones estadísticas de un periodo determinado con respecto a la estadística de largo plazo, lo que indicará si ocurre o no cambio climático.

La variabilidad estacional de la serie temporal de precipitaciones se determinó según Arrastía & Limia (2011) considerando los valores mensuales de la variable; mientras que la variabilidad interanual se determinó según Olivares *et al.* (2013) para las variables precipitación (anual, $P_{año}$; del periodo húmedo, P_{ph} y del periodo seco P_{ph}), número de días con lluvias (anual, $DLL_{año}$; del periodo húmedo, DLL_{ph} y

del periodo seco DLL_{ph}) y temperatura media (anual, T_a ; del periodo húmedo, T_{ph} y del periodo seco T_{ph}).

La tendencia de las variables climatológicas analizadas se obtuvo mediante el método de regresión lineal simple (Alcántara *et al.*, 2014) en función de los valores observados de las precipitaciones, el número de días con lluvia y la temperatura para la escala de tiempo anual y los periodos húmedo y seco. Se utilizó el método de los mínimos cuadrados (Campos, 2014) para definir la pendiente de la línea de tendencia, la cual indica la magnitud y orientación del cambio climático. Las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

$$Y = a + b.X \quad (2.13)$$

$$b = \frac{N.\sum X.Y - \sum X.\sum Y}{N.\sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (2.14)$$

La curva sumaria o acumulativa de la precipitación se calculó según Hernández *et al.* (2016) como la suma acumulativa de los valores promedio mensuales de la precipitación para un periodo de tiempo dado (últimos 5, 10, 15 y 20 años), respecto a la suma acumulativa de los valores promedios mensuales de la misma variable climática para un periodo largo de tiempo conocido como norma (serie igual o mayor a 30 años). Las precipitaciones analizadas fueron: precipitación acumulada normal, $Pac_{(normal)}$; precipitación acumulada de los últimos cinco años, Pac_{5A} ; precipitación acumulada de los últimos diez años, Pac_{10A} ; precipitación acumulada de los últimos 15 años, Pac_{15A} ; precipitación acumulada de los últimos 20 años, Pac_{20A} .

Los patrones de desplazamientos se construyeron conforme al procedimiento utilizado por Alfaro & Santos (2012). En esta investigación los patrones se representaron mediante dos curvas de dispersión, donde la divergencia de los

valores promedio mensuales de cada periodo analizado respecto a la curva normal indicó la existencia de un cambio climático. Las variables analizadas fueron:

- a) Precipitaciones (precipitación normal, P_{norm} ; precipitación de los últimos cinco años, P_{5A} ; precipitación de los últimos diez años, P_{10A} ; precipitación de los últimos 15 años, P_{15A} ; precipitación de los últimos 20 años, P_{20A}).
- b) Número de días con lluvias (número de días con lluvias normal, DLL_{norm} ; número de días con lluvias de los últimos cinco años, DLL_{5A} ; número de días con lluvias de los últimos diez años, DLL_{10A} ; número de días con lluvias de los últimos 15 años, DLL_{15A} ; número de días con lluvias de los últimos 20 años, DLL_{20A}).

El análisis de los indicadores curva sumaria y patrón de desplazamiento se sustentó en las categorías de evaluación propuestas en esta investigación a partir de la comparación del valor instantáneo de la variable analizada respecto al error relativo promedio superior al 10% con signo positivo o negativo. El error relativo promedio se determina mediante la ecuación siguiente:

$$E_r = \frac{X_i - X_{norma}}{X_i} 100 \quad (2.15)$$

Donde:

E_r : error relativo para la variable x en estudio (%).

X_i : valor de la variable para el año i .

X_{norma} : valor promedio hiperanual de la variable analizada (norma).

Las anomalías climáticas se calcularon como las diferencias algebraicas de la variable climática analizada respecto a su valor promedio hiperanual (Labraga *et al.*, 2011; Verdezoto, 2021). Las variables analizadas fueron las precipitaciones anuales, el número de días con lluvias anuales, la temperatura media anual y la

humedad relativa media anual. Este indicador se definió mediante la expresión siguiente:

$$A_x = X_i - X_m \quad (2.16)$$

Donde:

A_x : anomalía climática para la variable x en estudio.

X_i : valor de la variable para el año i .

X_m : media aritmética hiperanual de la serie de datos.

2.9 Caracterización de los meses según los niveles de precipitación

La caracterización de los meses según los niveles de precipitación se realizó a partir del criterio de Elías & Castellví (1996); por lo que se consideraron cinco clases descriptivas (Tabla 2.1) basada en la probabilidad de la lluvia.

Tabla 2.1 Caracterización de los meses según la probabilidad de la lluvia.

Clase	Probabilidad (%)
Muy húmedo (MH)	< 10
Húmedo (H)	10-25
Normal (N)	25-75
Seco (S)	75-90
Muy seco (MS)	> 90

La probabilidad de la lluvia se determinó a partir de la curva de probabilidad empírica, con la ecuación de Chegadaev (Villón, 2002). La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$Prob = \frac{m - 0,5}{N + 0,4} 100 \quad (2.17)$$

Donde:

$Prob$: probabilidad de ocurrencia de un miembro de la serie (%).

m : orden de los miembros de la serie organizados de forma descendente.

N : número total de miembros de la serie.

La probabilidad teórica se estimó a partir de la de los componentes de la curva binomial de distribución de Pearson tipo III (Pacheco *et al.*, 2007) debido a la limitación de la curva empírica para la obtención de los valores más extremos de probabilidad. Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$P_{sim} = K_p \cdot P_m \quad (2.18)$$

$$K_p = \psi \cdot C_v + 1 \quad (2.19)$$

$$K = \frac{P_i}{P_m} \quad (2.20)$$

$$C_v = \frac{\sum (K - 1)^2}{N - 1} \quad (2.21)$$

$$C_s = \frac{\sum (K - 1)^3}{(N - 1) \cdot C_v^3} \quad (2.22)$$

Donde:

P_{sim} : precipitación anual simulada a partir de la curva de probabilidad (mm).

P_m : precipitación media hiperanual (mm).

P_i : precipitación de cada año de la serie (mm).

N : número total de miembros de la serie.

ψ : desviaciones de la media obtenidas en la tabla de Foster Ribkin (Plúa, 2021).

C_v : coeficiente de variación.

C_s : coeficiente de asimetría.

2.10 Caracterización de la sequía meteorológica

La caracterización de la sequía meteorológica se realizó a través de los parámetros magnitud, duración e intensidad. La magnitud se obtuvo de la

sumatoria de los valores deficitarios de precipitaciones y la duración del conteo de los déficits consecutivos. En la determinación de la intensidad de la sequía se consideró la intensidad promedio y la intensidad máxima. La intensidad promedio se calculó como la relación de la magnitud entre la duración y la intensidad máxima como el valor mayor del déficit. Seguidamente se relacionan las ecuaciones utilizadas:

$$M = \sum(DEF) \quad (2.23)$$

$$DEF = \left| [P_i - P_{norma}]_{(-)} \right| \quad (2.24)$$

$$I_{med} = \frac{M}{D} \quad (2.25)$$

$$I_{max} = \max(DEF) \quad (2.26)$$

Donde:

M: magnitud de la sequía (mm).

DEF: déficit de precipitaciones (mm).

P_i: valor de la precipitación mensual o anual (mm).

P_{norma}: norma de precipitaciones de cada mes o año (mm).

I_{med}: intensidad promedio de la sequia (mm mes⁻¹; mm año⁻¹).

D: duracion temporal del evento de sequia (meses o años).

I_{max}: intensidad máxima de la sequia (mm mes⁻¹; mm año⁻¹).

2.11 Evaluación de la sequía meteorológica

La evaluación de la sequía meteorológica se realizó con el Índice Porcentaje de Precipitación Normal (PPN) por ser según Bhalme & Mooley (1980), uno de los más simples que puede aplicarse en diferentes escalas de tiempo (meses y años). Este índice se clasificó a partir del rango de magnitud de la sequía definida en esta investigación por la técnica de los quintiles. El Índice PPN se obtuvo con la

ecuación siguiente:

$$PPN = \frac{P_i}{P_{norma}} 100 \quad (2.27)$$

2.12 Índice pluvial para el desarrollo de la agricultura de secano

En la investigación se propone un índice pluvial para la evaluación de las potencialidades hidrológicas de garantizar el desarrollo de la agricultura de secano en una localidad determinada. Este indicador se fundamenta en el criterio de Rómulo (2014) sustentado en que el límite inferior de precipitación con la cual ya no es posible la producción de cosechas es de 250 ó 300 mm. En este caso el indicador pluvial propuesto expresa la sumatoria de las precipitaciones de cuatro meses consecutivos; debiéndose lograr un acumulado igual o superior a 300 mm en ese periodo. Este índice se calculó como:

$$P_{4m} = \sum_{i=1}^{n=4} P_i \geq 300 \text{ mm} \quad (2.28)$$

Donde:

P_{4m} : índice pluvial para evaluar potencialidades de la agricultura de secano (mm).

P_i : precipitación mensual (mm).

2.13 Impactos de la investigación en la producción agrícola

Los impactos de los resultados de la investigación en la producción agrícola se determinaron a partir de una investigación realizada en la Finca Tío Pedro del municipio de Venezuela, provincia Ciego de Ávila, Cuba en el año 2017 (Madrigal *et al.*, 2019) para el cultivo del maíz (*Zea mays* L.) a partir de los parámetros siguientes:

- a) Comportamiento hidrológico del año partir de la valoración de su acuosidad según la probabilidad de las precipitaciones.

- b) Fecha de siembra y cosecha del cultivo.
- c) Precipitación total ocurrida durante el ciclo vegetativo del cultivo.
- d) Número de días con lluvias en cada uno de los meses del ciclo vegetativo del cultivo.
- e) Intervalo entre lluvias.
- f) Necesidad de aplicación de riegos para suplir las demandas hídricas.
- g) Rendimientos alcanzados bajo estas condiciones climatológicas.

2.14 Desarrollo de un sistema informático para evaluar el cambio climático

Se desarrolló un sistema informático consistente en un sistema web en lenguaje de programación *Python* acorde con *Challenger et al. (2014)* con la finalidad de estimar las evidencias de cambios climáticos con exactitud y rapidez.

2.15 Validación del sistema informático

El sistema informático desarrollado en la investigación fue validado por especialistas de la Empresa de Aprovechamientos Hidráulicos (EAH) de la provincia de Ciego de Ávila con datos de equipos pluviométricos del municipio Venezuela. Los criterios utilizados para la validación fueron los siguientes: necesidad del software, utilidad para la empresa, rapidez, precisión y satisfacción del usuario.

2.16 Conclusiones parciales

- La comprobación de la calidad de los datos en una serie temporal de precipitaciones se realiza usualmente mediante los métodos gráficos y las pruebas paramétricas, no paramétricas y de aleatoriedad; sin embargo, en la investigación se utilizó el método para la desestacionalización que permite la obtención de una serie sin variaciones anómalas.

- La utilización del climograma cumple una doble función; como instrumento para la caracterización del clima en el área objeto de estudio y como indicador para la evaluación de la ocurrencia de sequías en los años hidrológicos analizados.
- La clasificación de la sequía meteorológica a partir del Índice Porcentaje de Precipitación Normal (*PPN*) se realiza con una tabla derivada del método de los quintiles a partir de la magnitud de los déficits de precipitaciones. Esta tabla permite clasificar según el sistema de colores propuesto, el nivel de gravedad del fenómeno.
- Se utiliza el índice pluvial como herramienta para evaluar la potencialidad de desarrollo de la agricultura de secano en cultivos de ciclo corto en una localidad determinada.
- El desarrollo de un sistema informático en lenguaje de programación Python es novedoso y contribuye a la estimación de evidencias de cambio climático con exactitud y rapidez.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se exponen los resultados fundamentales de la investigación, los cuales comprenden el análisis de indicadores para la determinación de evidencias de cambio climático en el municipio de Venezuela de la provincia Ciego de Ávila y sus efectos sobre las precipitaciones. Se analizan los resultados de la desestacionalización de la serie de precipitaciones, el climograma de la localidad, el índice de aridez, la variabilidad estacional e interanual de precipitaciones, la acuosidad estacional e interanual en función de la probabilidad de la lluvia, los parámetros característicos de la sequía meteorológica, los impactos de la investigación en la producción agrícola y el desarrollo del software INFO_CLIM para determinar indicadores relacionados con el cambio climático.

3.1 Análisis de la desestacionalización de la serie de precipitaciones

En la Figura 3.1 se muestra la comparación gráfica entre la precipitación real (P_{real}) y la precipitación desestacionalizada (P_{desest}), lo que permite apreciar la transformación de la serie cronológica real mediante las correcciones realizadas a través de los Índices Estacionales mensuales los cuales variaron entre 0,907 y 0,995 con un valor promedio de 0,979.

Este resultado resulta de gran importancia para el desarrollo de proyectos hidrológicos porque permite la utilización de datos de precipitaciones ajustadas estacionalmente, sin la influencia de factores exógenos debido a variaciones climáticas y posibles errores humanos entre otros.

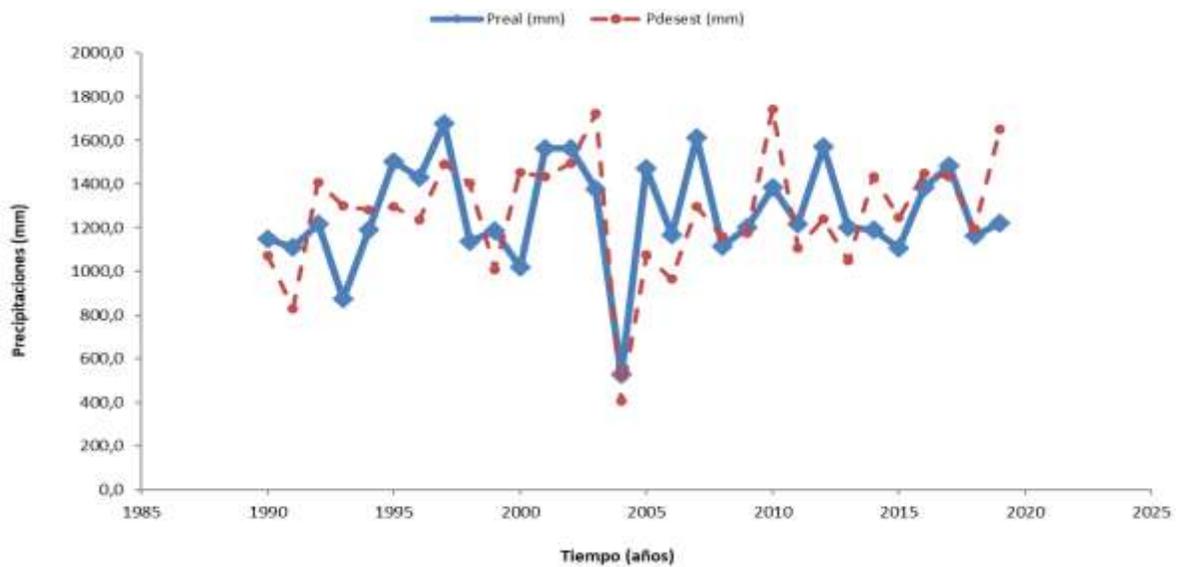


Figura 3.1 Comparación entre la precipitación real y la desestacionalizada.

En la Figura 3.2 se muestra el comportamiento de las series de precipitaciones del periodo húmedo (Pph) y del periodo seco (Pps). Se comprueba que el 99% de los años del periodo húmedo alcanzan valores por encima de 1000 mm anuales, excepto los años 1993 y 2004 con 874,5 y 529,9 mm respectivamente; mientras que, en el periodo seco, el 80% de los años sobrepasan los 150,0 mm anuales. Se distingue el año 2004 con solo 23,1 mm en ese periodo.

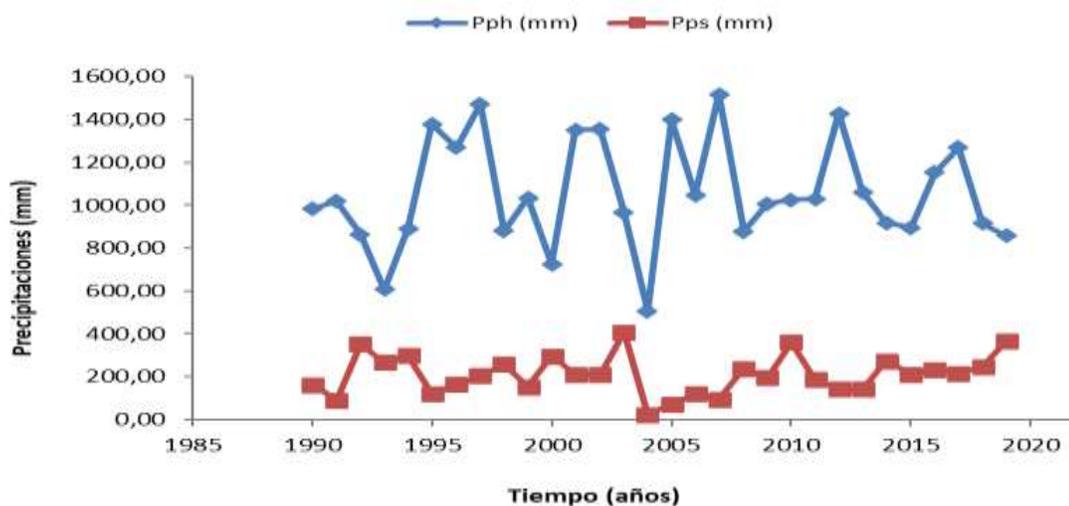


Figura 3.2 Series de precipitación del periodo húmedo y del periodo seco.

En la Figura 3.3 se presenta la comparación entre la serie de precipitaciones correspondiente a los datos reales observados en la estación meteorológica (P_{real}) y las precipitaciones desestacionalizadas por el método de la media móvil ($P_{med\ mov}$) y el método de suavización exponencial ($P_{suav\ exp}$). Se observa que la serie de precipitación real muestra gran variabilidad con saltos notables por encima y por debajo de la media; en especial en el año 2004. Estos saltos indican la presencia de valores atípicos que le confieren a la serie un nivel inestable y sin tendencia; sin embargo, la utilización de los métodos de la media móvil y la suavización exponencial permiten obtener una serie de tiempo sin variaciones anómalas, lo que favorece el proceso de pronóstico. En la investigación el error absoluto promedio encontrado para ambos métodos fue aceptable, con valores de 17,06 y 16,12% respectivamente según criterios de Gan *et al.* (2008).

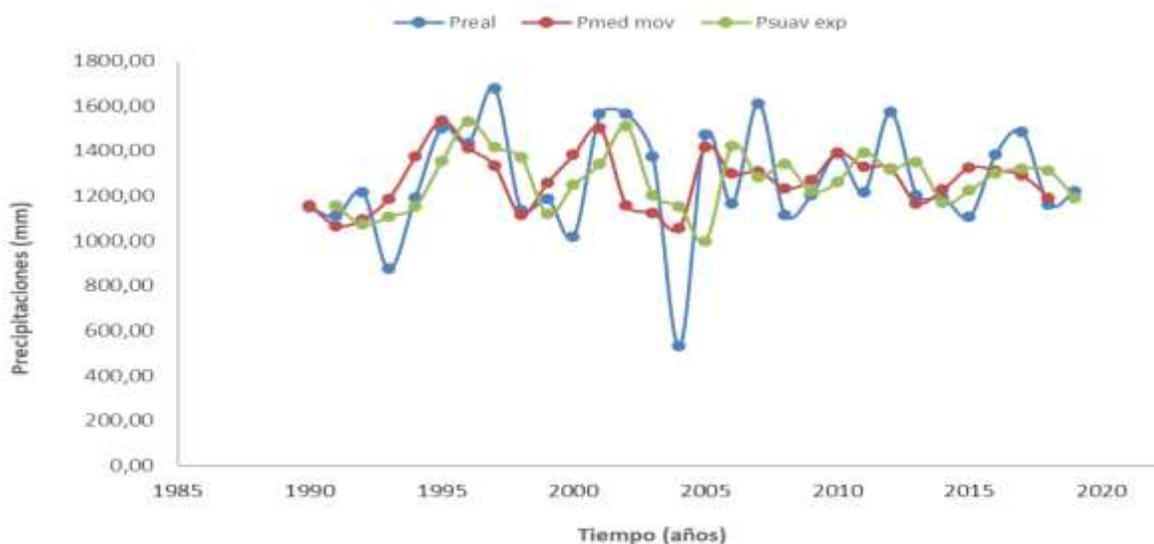


Figura 3.3 Precipitación real, media móvil y suavización exponencial.

3.2 Análisis de los estadígrafos fundamentales de las precipitaciones

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados de los estadígrafos fundamentales de la serie temporal de precipitaciones. Se observa que los meses de menor precipitación corresponden al periodo de noviembre a marzo con valores

comprendidos entre 3,7 y 24,4 mm; siendo enero y febrero los meses de menor pluviosidad. Los mayores valores de precipitaciones ocurren entre los meses de mayo a octubre con cuantías de 28,7 a 134,0 mm. Los meses de mayor acuosidad fueron junio y septiembre. Los valores mínimos de precipitaciones se registraron en los meses de noviembre hasta abril con 0,0 a 2,1 mm. Los valores máximos se encontraron en los meses de mayo a octubre con 289,9 a 562,1 mm; en este análisis se destacan los meses de junio y septiembre con láminas de lluvia superiores a 550,0 mm.

Tabla 3.1 Estadígrafo de la serie temporal de precipitaciones.

Estadígrafo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Media	24,9	24,4	35,1	61,0	178,5	213,7	142,2	159,6	228,7	134,0	38,9	26,2
Error típico	4,8	6,5	7,3	8,9	16,8	23,2	10,6	14,9	20,0	14,4	5,6	5,3
Mediana	15,3	13,0	16,6	44,4	185,9	190,1	138,1	141,5	203,7	118,6	42,6	17,5
Moda	0,0	0,8	2,1	20,1	-	-	-	-	279,6	-	45,2	11,6
Desviación estándar	26,3	35,8	40,0	48,9	92,0	127,2	57,8	81,6	109,6	79,1	30,6	28,9
Curtosis	2,2	5,6	5,3	-0,7	0,2	0,2	0,0	0,3	1,7	1,9	0,2	6,5
Coefficiente de asimetría	1,7	2,3	2,1	0,7	0,4	0,6	0,5	0,5	1,2	1,0	0,7	2,3
Rango	99,4	154,2	180,7	158,6	359,6	528,0	240,8	361,9	482,3	361,5	112,7	135,7
Mínimo	0,0	0,0	2,1	0,0	19,3	34,1	49,1	1,1	74,7	6,6	0,3	0,0
Máximo	99,4	154,2	182,8	158,6	378,9	562,1	289,9	363,0	557,0	368,1	113,0	135,7

3.3 Análisis del climograma construido para el municipio de Venezuela

El climograma de Gausson construido en esta investigación permitió conocer el ambiente climático del municipio de Venezuela a partir de la síntesis de las características principales del clima en la localidad con base en el promedio de las variables temperatura y precipitación; además de los resultados del índice de aridez (IA) para los meses en que los valores de las precipitaciones quedan por debajo de las temperaturas promedios.

En la Figura 3.4 se muestra el comportamiento estacional de la temperatura y la precipitación a través del climograma del municipio de Venezuela en la provincia de Ciego de Ávila. La norma de estas dos importantes variables y otros elementos

del clima definen dos estaciones climáticas bien definidas, denominadas periodo lluvioso (mayo-octubre) y periodo poco lluvioso (noviembre-abril) lo cual ha sido informado por otros estudios realizados en el país como los de Herrera *et al.* (2018) en el municipio de San José de las Lajas, provincia de Mayabeque, Cuba.

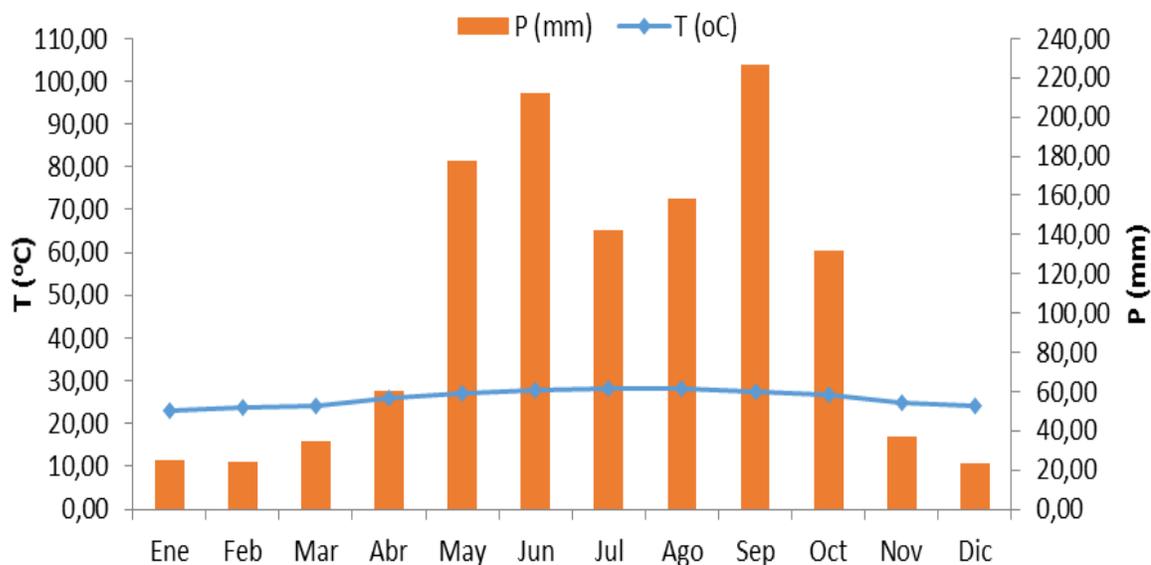


Figura 3.4 Climograma municipio Venezuela.

El régimen hídrico del municipio de Venezuela se destaca por una precipitación anual de 1253,0 mm como promedio, siendo los meses de septiembre y junio los más lluviosos con 228,7 mm y 213,7 mm respectivamente. Este resultado es ligeramente inferior a la pluviometría anual encontrada por Aranguren *et al.* (2015) en investigaciones realizadas en la provincia de Matanzas; pero resultó ser similar a los acumulados en los meses más lluviosos. En el municipio de Venezuela el periodo seco presenta una precipitación total de 204,0 mm (16%); mientras que el periodo no seco (húmedo) ofrece una precipitación total de 1049,0 mm (84%).

El régimen térmico se caracteriza por una temperatura máxima media del mes más cálido (julio) de 28,2 °C y una mínima media del mes más frío (enero) de 23,0 °C. En esta región la temperatura media del mes más cálido fue menor en relación

con la encontrada por Aranguren (2009) en una investigación realizada en Jagüey Grande, Matanzas, donde se alcanzaron valores de 33,6 °C; sin embargo, la temperatura media del mes más frío fue notablemente inferior con valor de 14,3 °C. La oscilación térmica anual de municipio Venezuela es de 5,20°C.

Durante la investigación se demostró utilizando el índice de Gausson para la determinación del Índice de Aridez, que los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, marzo y abril fueron los que presentaron la categoría de seco por encontrarse por debajo del valor de la temperatura media hiperanual con valores límites extremos de 24,0 mm y 60,0 mm, lo cual corrobora el criterio sugerido por Martínez (2013).

En la Tabla 3.2 se presentan los rangos de precipitaciones medias mensuales para la determinación de la categoría de evaluación de los meses secos según Elías & Castellví (1996). Se comprueba que los meses secos en el municipio Venezuela se clasificaron en tres categorías: mes seco severo (diciembre, febrero y enero) con precipitaciones de 24,0 y 25,0 mm; mes seco fuerte (marzo y noviembre) con precipitaciones de 34,0 mm y 36,0 mm respectivamente y mes seco incipiente (abril) con precipitación de 60,0 mm. Los meses restantes obtuvieron la categoría de no secos.

Tabla 3.2 Categoría para la evaluación de los meses secos.

Rango de precipitación mensual (mm)	Categoría de evaluación
24 - 30	Severo
31 - 38	Fuerte
39 - 45	Moderado
46 - 52	Ligero
53- 60	incipiente

Los estudios sobre el índice de aridez dan una idea objetiva de la situación del agua en relación a su comportamiento temporal y espacial, y definen las características intrínsecas del lugar, a partir de lo cual se puede evaluar su

potencial productivo; por lo que son indispensables para la planeación del uso del recurso agua, principalmente en zonas con disponibilidad limitada (Mercado *et al.*, 2010).

Los resultados presentados permiten afirmar que según la clasificación de Köppen (modificada), el clima del municipio Venezuela es tropical y estacionalmente húmedo, con influencia marítima y rasgos de semicontinentalidad, similar al resto de las regiones de Cuba (Lima *et al.*, 1988). En este tipo de clima, los factores que determinan su formación están asociados a la cantidad de radiación solar que se recibe por proximidad al Trópico de Cáncer, las particularidades de la circulación atmosférica y la diferente influencia de las características físico-geográficas del territorio (Ramírez *et al.*, 2011).

La estación seca se identifica por las variaciones del tiempo y el clima debido al paso de sistemas frontales, a la influencia anticiclónica de origen continental y a los centros de bajas presiones extratropicales; mientras que la estación húmeda se caracteriza por presentar pocas variaciones en el tiempo y la influencia del Anticiclón del Atlántico Norte; los cambios más importantes se deben a la presencia de ondas del este y ciclones tropicales (Celeiro, 2001).

Los resultados del climograma permiten tomar medidas técnicas para el beneficio económico de las actividades agrícolas mediante las informaciones obtenida de las estaciones meteorológicas; lo que favorece el manejo de los cultivos; sin embargo, esta valiosa fuente de datos no es suficientemente utilizada por los técnicos y los agricultores (Burba & Cavagnaro, 2021).

3.4 Análisis de las evidencias de cambio climático

En la Figura 3.5 se muestra la variabilidad interanual de las precipitaciones anuales ($P_{año}$), las precipitaciones del periodo húmedo (P_{ph}) y las precipitaciones del periodo seco (P_{ps}). Se observó que la serie de precipitaciones anuales y

precipitaciones del periodo húmedo presentan un comportamiento similar; aunque con valores diferentes; pues las precipitaciones de los meses del periodo húmedo representan el 84% de las precipitaciones anuales. En ambos casos se evidencia que los años de mayor pluviometría fueron 1997, 2001, 2002, 2007, 2012 y 2017; mientras que los de menor precipitación pertenecieron a los años 1993, 2000 y 2004. La tendencia lineal es positiva con pendiente de 2,20 y 1,09 para las precipitaciones anuales y precipitaciones del periodo húmedo respectivamente.

En la propia Figura 3.5 se constata que los picos de precipitaciones máximas y mínimas hiperanuales del periodo seco manifiestan un comportamiento diferente en comparación con las precipitaciones anuales y precipitaciones del periodo húmedo. Las mayores precipitaciones se encontraron en los años 1992, 2003, 2010, y 2019 con acumulados cercanos a los 350 mm; mientras que el menor valor apareció en el año 2004 con 23,0 mm. La tendencia lineal también es positiva con pendiente de 1,10.

Este resultado permite afirmar que las precipitaciones en el municipio Venezuela muestran tendencia al incremento en la escala de tiempo anual y en los periodos húmedo y seco. Las ecuaciones de regresión obtenidas para determinar el valor de la tendencia lineal de las precipitaciones fueron las siguientes:

$$P_{\text{año}} = 2,20T - 3148,10 \quad (3.1)$$

$$P_{ph} = 1,09T - 1146,30 \quad (3.2)$$

$$P_{ps} = 1,10T - 2001,90 \quad (3.3)$$

Donde:

$P_{\text{año}}$: Precipitaciones anuales (mm).

P_{ph} : Precipitaciones del periodo húmedo (mm).

P_{ps} : Precipitaciones del periodo seco (mm).

T: Tiempo (años).

En la Figura 3.6 se expone la variabilidad interanual del número de días con lluvias anuales ($DLL_{año}$), el número de días con lluvias del periodo húmedo (DLL_{ph}) y el número de días con lluvias del periodo seco (DLL_{ps}). En el análisis de esta variable se encontró también un comportamiento similar al de las precipitaciones en el periodo húmedo y el periodo seco. Los años con mayor cantidad de número de días con lluvias en el periodo anual fueron 1991, 2007 y 2009 con valores de 131, 141 y 139 respectivamente; mientras que el año 2004 fue el más crítico con un valor de 83.

En el periodo húmedo el valor más alto estuvo en el año 2007 con un valor de 110; no obstante, sobresalieron valores mínimos en los años 1993, 2000, 2004 y 2008 con 63, 69, 70 y 73 respectivamente. La tendencia lineal es positiva con pendiente de 0,23 para el número de días con lluvias anuales y el número de días con lluvias del periodo húmedo respectivamente; lo que indica que las evidencias de cambio climático tienden al incremento del número de días con lluvias anuales y en el periodo húmedo.

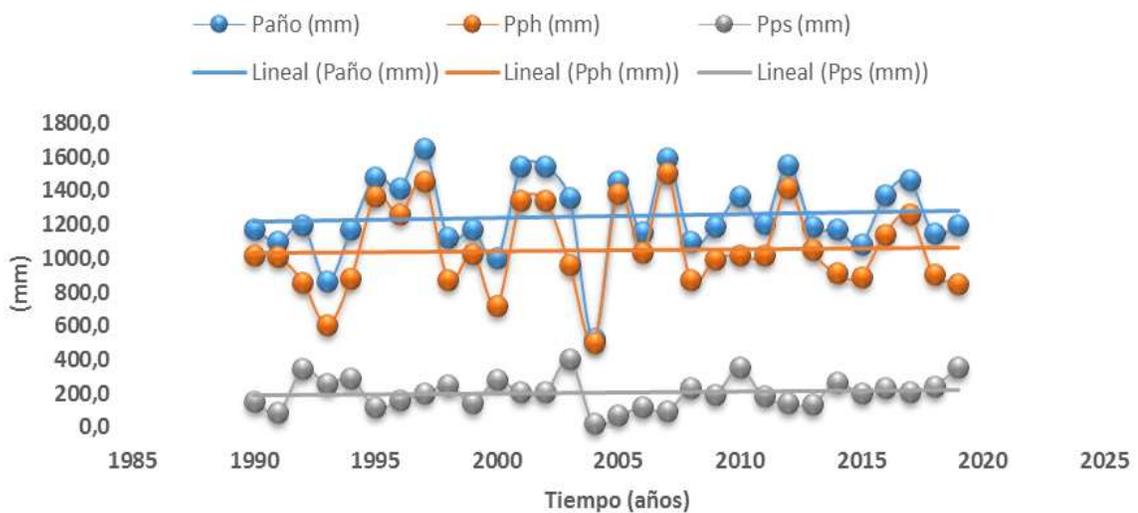


Figura 3.5 Variabilidad interanual de precipitaciones.

En la Figura 3.6 se observa también que el máximo número de días con lluvias en el periodo seco se registró en los años 1992, 2008 y 2017 con valores de 42, 44 y 43 respectivamente; mientras que los menores valores estuvieron en los años 2004 y 2005 con 13 y 19 respectivamente. La curva muestra una tendencia prácticamente nula; pues el valor de la pendiente es de 0,005. Este resultado indica que en esta variable no se observan evidencias de cambio climático en el periodo evaluado.

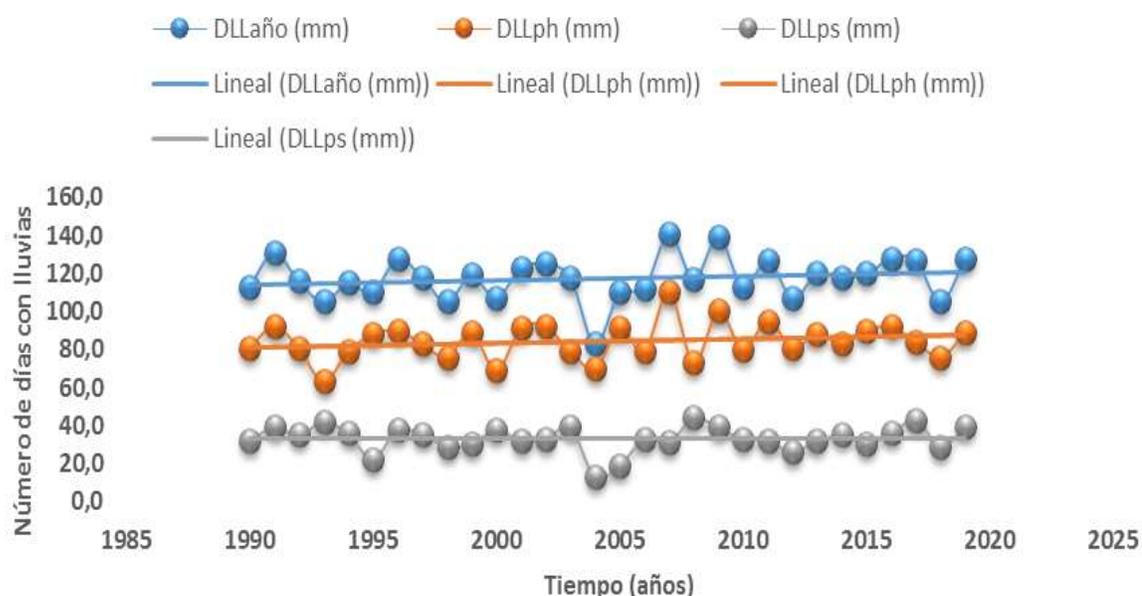


Figura 3.6 Variabilidad interanual del número de días con lluvias.

Los resultados expuestos demuestran que en el municipio Venezuela existe una tendencia al incremento del número de días con lluvias anuales y en el periodo húmedo; no siendo así en el periodo seco. Las ecuaciones de regresión obtenidas para determinar el valor de la tendencia lineal del número de días con lluvias fueron las siguientes:

$$DLL_{año} = 0,23T - 349,80 \quad (3.4)$$

$$DLL_{ph} = 0,23T - 373,10 \quad (3.5)$$

$$DLL_{ps} = 0,005T + 23,30 \quad (3.6)$$

Donde:

$DLL_{año}$: Número de días con lluvias anuales.

DLL_{ph} : Número de días con lluvias del periodo húmedo.

DLL_{ps} : Número de días con lluvias del periodo seco.

T : Tiempo (años).

En la Figura 3.7 se muestra la variabilidad interanual de la temperatura media anual, la temperatura media del periodo húmedo y la temperatura media del periodo seco de la serie cronológica estudiada. La tendencia lineal de la temperatura media anual y la temperatura media del periodo húmedo es positiva con valores de pendiente muy pequeña de 0,005 y 0,002 respectivamente (prácticamente nula); por lo que no se demuestra evidencias de cambio climático.

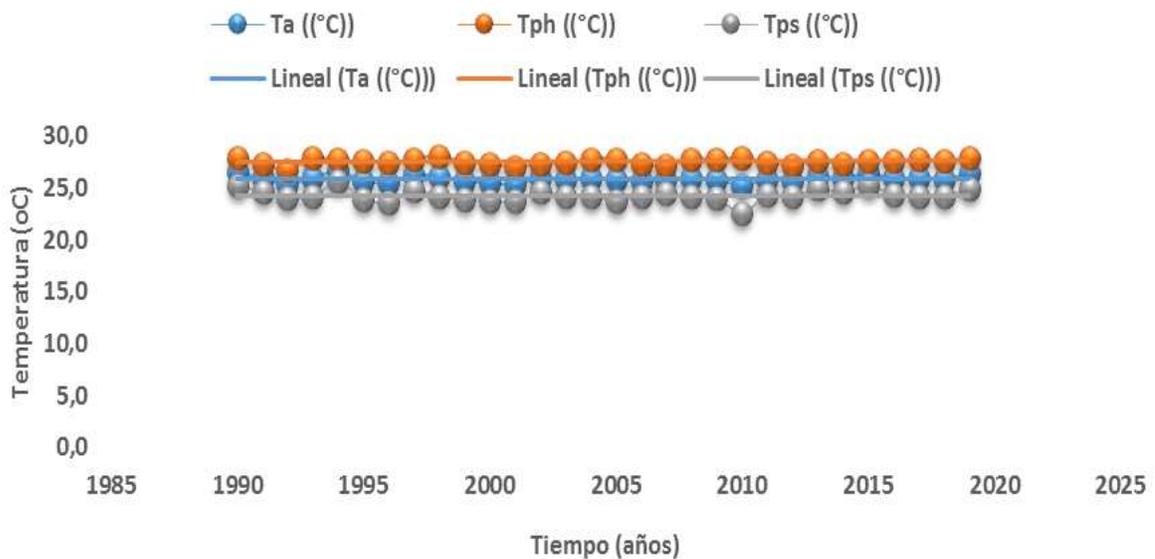


Figura 3.7 Variabilidad interanual de la temperatura media en los periodos seco y húmedo.

En el caso de la temperatura media del periodo seco la tendencia lineal es negativa con un valor de pendiente muy pequeña de 0,0006; por lo que tampoco se aprecia evidencia de cambio climático. Las ecuaciones de regresión obtenidas para determinar el valor de la tendencia lineal de la temperatura fueron las siguientes:

$$T_a = 0,005T + 17,69 \quad (3.7)$$

$$T_{ph} = 0,002T - 22,49 \quad (3.8)$$

$$T_{ps} = 0,0006T + 25,45 \quad (3.9)$$

Donde:

T_a : Temperatura media anual (°C).

T_{ph} : Temperatura media del periodo húmedo (°C).

T_{ps} : Temperatura media del periodo seco (°C).

T : Tiempo (años).

Seguidamente en la Tabla 3.3, elaborada por el autor de esta investigación se presenta el análisis de los indicadores curva sumaria y patrón de desplazamiento los cuales están sustentados en las categorías de evaluación propuestas en esta investigación a partir de la comparación del valor instantáneo de la variable analizada respecto al error relativo promedio superior al 10% con signo positivo o negativo. El error relativo promedio se determina mediante la ecuación siguiente:

$$E_r = \frac{x_i - x_{norma}}{x_i} 100 \quad (3.10)$$

Donde:

E_r : Error relativo para la variable x en estudio (%).

x_i : Valor de la variable para el año i .

X_{norma} : Es el valor promedio hiperanual de la variable analizada (norma).

Tabla 3.3 Categoría para la evaluación del cambio climático.

Rango de comparación	Categoría de evaluación
$X_i \geq E_r$ positivo de 10%	Cambio climático por exceso.
$X_i \leq E_r$ negativo de 10%	Cambio climático por déficit.

En las Figuras 3.8 se expone el análisis estacional de la curva sumaria de la precipitación acumulada normal, precipitación acumulada de los últimos cinco años, precipitación acumulada de los últimos diez años, precipitación acumulada de los últimos 15 años y precipitación acumulada de los últimos 20 años. Se observa que los cambios climáticos solo se producen en la precipitación acumulada de los últimos cinco y diez años en cinco meses (42%) y cuatro meses (33%) respectivamente.

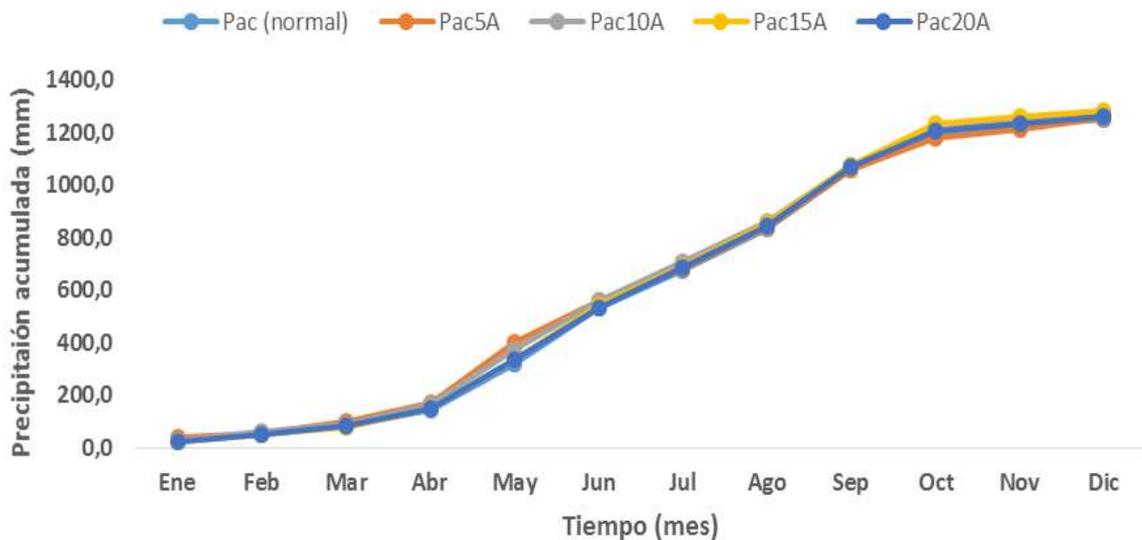


Figura 3.8 Curva sumaria de la precipitación acumulada en los últimos 5, 10, 15 y 20 años.

En la precipitación acumulada de los últimos cinco años se destacan los meses de enero y mayo con errores relativos positivos de 42% y 21% respectivamente (evidencias de cambio climático por exceso de precipitaciones). En el resto de las curvas sumarias de precipitación acumulada no se comprobaron evidencias de cambio climático.

En la Figuras 3.9 se muestra el análisis estacional del indicador patrón de desplazamiento de la precipitación normal, precipitación de los últimos cinco años, precipitación de los últimos diez años, precipitación de los últimos 15 años y precipitación de los últimos 20 años. Se observa que las mayores evidencias de cambios climáticos se producen en la precipitación de los últimos cinco años con ocho meses del año implicados (67%), destacándose el mes de febrero con un error relativo negativo de 84% (evidencia de cambio climático por déficit de precipitaciones), seguido por diciembre y enero con errores relativos positivos de 43% y 42% respectivamente (evidencia de cambio climático por exceso de precipitaciones); así como junio y julio con errores relativos negativos de 31% y 23% respectivamente (evidencia de cambio climático por déficit de precipitaciones).

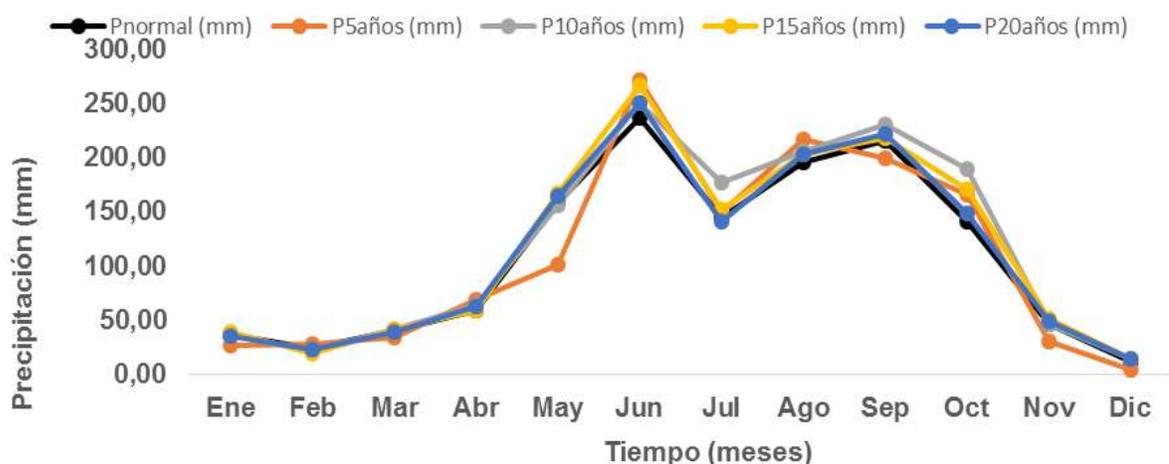


Figura 3.9 Patrón de desplazamiento de la precipitación en los últimos 5, 10, 15 y 20 años.

En el análisis del indicador patrón de desplazamiento de la precipitación de los últimos diez y quince años se constata de evidencias de cambio climático en los meses de julio y octubre lo que representa el 16,7% de los meses del año y en el patrón de desplazamiento la precipitación de los últimos 20 años, solo en el mes julio se observó evidencias de cambio climático, lo que representa el 8,3% de los meses del año.

Los resultados de este indicador revelan que las evidencias de cambios climáticos se han intensificado en los últimos 5 años; lo que concuerda con Useros (2013) quien señala, que este fenómeno está asociado al incremento de los gases de efecto invernadero, resultantes de las actividades humanas en particular el uso de combustibles fósiles que afectan a la humanidad por sus efectos medioambientales y amenaza los sistemas hidrológicos, los sistemas de agua dulce y a la productividad agrícola y forestal.

En la Figuras 3.10 se presenta el análisis estacional del indicador patrón de desplazamiento del número de días con lluvias normal, número de días con lluvias de los últimos cinco años, número de días con lluvias de los últimos diez años, número de días con lluvias de los últimos 15 años y número de días con lluvias de los últimos 20 años. Las evidencias de cambio climático más notables se encontraron en el número de días con lluvias de los últimos cinco años y el número de días con lluvias de los últimos diez años.

Las evidencias de cambio climático en el número de días con lluvias de los últimos cinco años aparecen en cuatro meses, lo que representa el 33,3% de los meses del año. Los mayores valores se manifestaron en enero y mayo con errores relativos positivos de 29% y 20% respectivamente. En cuanto a las evidencias de cambio climático en el número de días con lluvias de los últimos diez años, se determinó que estos ocurren en cinco meses (41,7% de los meses del año), destacándose febrero con un error relativo positivos de 20% y diciembre con un

error relativo negativo de 20%. En relación con el número de días con lluvias de los últimos 15 y 20 años, las evidencias de cambio climático solo aparecen durante dos meses en ambos casos, lo que representa el 16,7% de los meses del año.

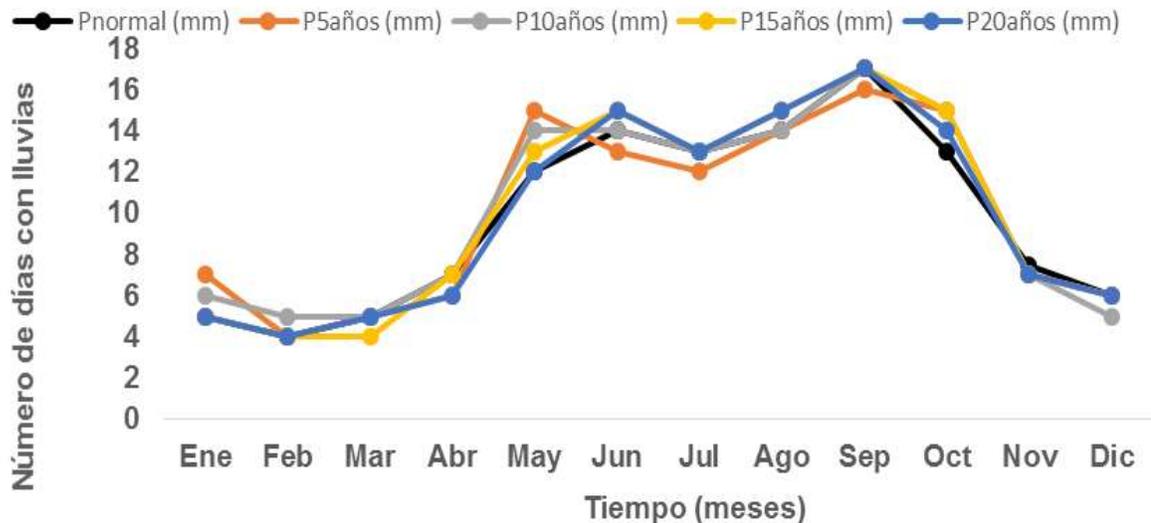


Figura 3.10 Patrón de desplazamiento del número de días con lluvias en los últimos 5, 10, 15 y 20 años.

En las Figuras 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 se muestra el comportamiento de las anomalías de las precipitaciones anuales, el número de días con lluvias, la temperatura y la humedad relativa. En el análisis de las anomalías de las precipitaciones anuales se encontró que 12 años (40%) tuvieron anomalías positivas; destacándose los años 1997, 2007 y 2012 con valores de 408 mm, 345 mm y 304 mm respectivamente, el resto de los años presentaron anomalías negativas (60%) donde el año 2004 obtiene el valor más sobresaliente con 800 mm.

Las anomalías del número de días con lluvias fueron positivas en 16 años (53%), descollando los años 2007 y 2009 con valores de 23 días y 9 días

respectivamente. Las anomalías negativas se encontraron en 14 años (47%) donde el año 2004 alcanzó el valor más elevado con 35 días.

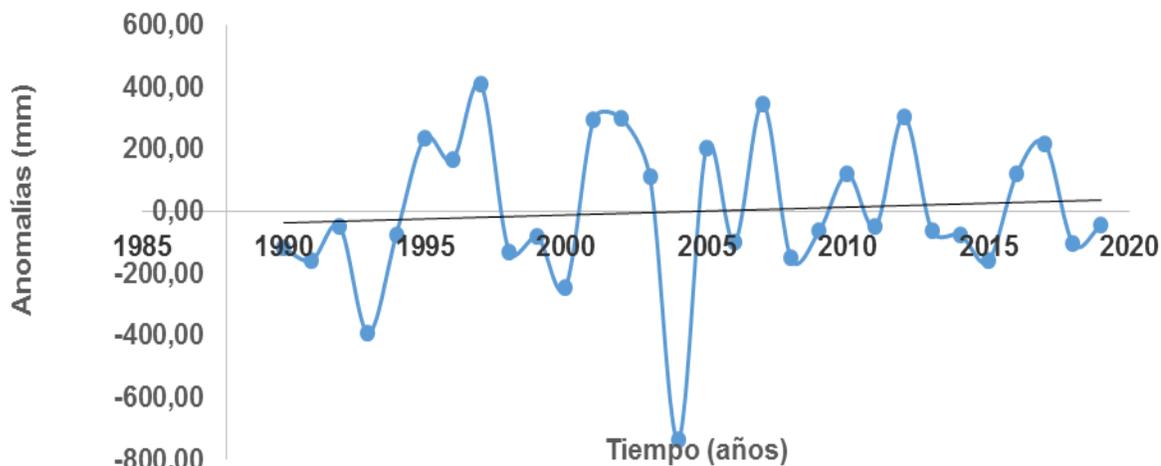


Figura 3.11 Anomalías de las precipitaciones anuales.

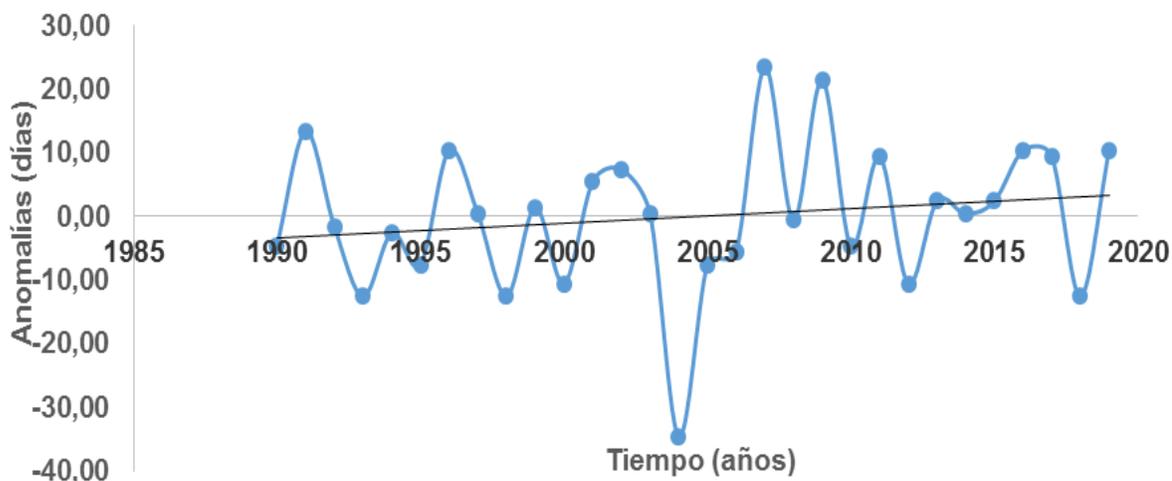


Figura 3.12 Anomalías del número de días con lluvias.

Las anomalías de temperatura y humedad relativa tuvieron un 50% de ocurrencias en el sentido positivo y negativo. En el caso de la temperatura las anomalías más relevantes se encontraron en los años 1990 con 0,64 °C y 1994 con 0,76 °C. Las anomalías negativas de temperatura estuvieron en los años 2001 y 2010 con 0,57 °C y 0,68 °C. Las anomalías positivas de humedad relativa más altas se

encontraron en los años 2001 y 1991 con 2,3% y 2,1% respectivamente; mientras que las anomalías negativas más baja apareció en el año 2004 con 3,7%.

En general se demuestra que las anomalías permiten identificar las evidencias de cambio climático a través del comportamiento interanual de las variables analizadas en una determinada escala de tiempo. El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI, 2008) demostró la utilidad de la utilización de las anomalías para el análisis climatológico de las precipitaciones y la temperatura media del aire en los municipios costeros de ese país.

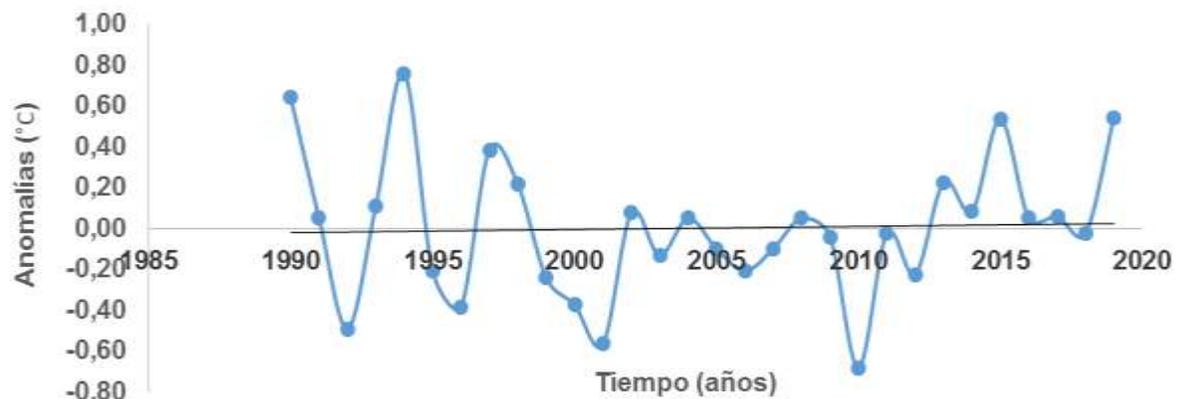


Figura 3.13 Anomalías de la temperatura.

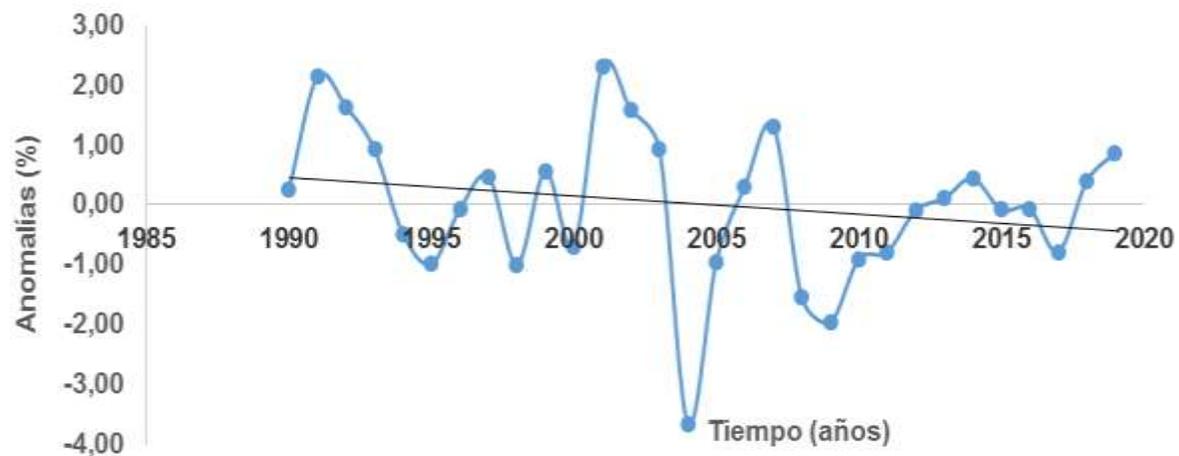


Figura 3.14 Anomalías de la humedad relativa.

La tendencia lineal de las anomalías de precipitaciones anuales, número de días con lluvias y temperatura fueron positivas con pendiente de 2,51; 0,23 y 0,002; no siendo así en las anomalías de humedad relativa, las cuales fueron negativas con pendiente de 0,03. Las ecuaciones de regresión obtenidas para determinar el valor de la tendencia lineal fueron las siguientes:

$$AP_{anual} = 2,51T - 5434,10 \quad (3.11)$$

$$AD_{LL} = 0,23T - 467,35 \quad (3.12)$$

$$AT_a = 0,002T - 3,39 \quad (3.13)$$

$$AH_r = - 0,03T + 60,40 \quad (3.14)$$

Donde:

AP_{anual} : Anomalía climática de las precipitaciones anuales (mm).

AD_{LL} : Anomalía climática del número de días con lluvias (días).

AT_a : Anomalía climática de la temperatura media anual (°C).

AH_r : Anomalía climática de la humedad relativa (%).

T : Tiempo (años).

3.5 Análisis descriptivo de las lluvias en los últimos diez años

Los resultados analizados anteriormente demuestran que los principales cambios climáticos en las variables seleccionadas ocurren en los últimos 10 años. En la Tabla 3.4 se muestran los valores de las precipitaciones mensuales y anuales en los últimos diez años de la serie de precipitaciones. Se observa que los valores promedios en el periodo estacional definen con claridad un periodo seco comprendido desde noviembre hasta abril con un rango comprendido en el intervalo [17,8 – 70,5] mm, donde los meses de febrero y enero se presentan como los más secos.

En la propia tabla aparecen los valores anuales de las precipitaciones con una media de 1287,4 mm para el periodo 2011 al 2020, la cual resultó ligeramente superior a la norma (1253 mm) para una serie de 30 años (1990-2019).

Tabla 3.4 Valores de las precipitaciones mensuales y anuales en mm.

MES	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	<i>P_{mes}</i>
Ene.	7,6	8,1	15,2	18,6	26,7	99,4	15,3	56,2	17,4	5,2	27,0
Feb.	3,0	12,4	0,8	87,8	3,1	4,6	27,8	1,5	29,4	7,8	17,8
Mar.	9,0	19,4	2,1	35,7	7,1	84,6	43,1	16,6	78,5	8,7	30,5
Abr.	88,2	92,0	45,7	73,8	20,1	30,3	29,3	148,4	129,5	47,4	70,5
May.	197,2	345,3	193,3	181,1	245,2	121,9	202,1	369,2	212,2	277,2	234,5
Jun.	359,1	145,2	178,5	187,1	105,3	399,3	84,2	176,9	50,0	108,6	179,4
Jul.	154,9	159,9	185,2	117,1	108,6	101,5	92,1	101,0	181,0	143,4	134,5
Ago.	83,9	307,0	169,9	74,8	183,2	281,9	189,7	51,1	106,1	38,7	148,6
Sep.	179,3	268,4	194,2	149,6	87,5	192,5	557,0	140,1	137,6	118,1	202,4
Oct.	100,7	202,5	140,2	208,7	166,5	55,1	144,0	77,3	169,5	264,5	152,9
Nov.	38,5	0,4	54,3	45,8	93,8	6,0	49,7	0,3	23,4	259,4	57,2
Dic.	41,1	11,1	24,0	11,6	59,1	8,4	50,0	24,6	87,5	4,4	32,2
<i>P_{anual}</i>	1262,5	1571,7	1203,4	1191,7	1106,2	1385,5	1484,3	1163,2	1222,1	1283,4	1287,4

En la Tabla 3.5 se exponen los valores de los estadígrafos fundamentales de la precipitación promedio de los meses de la serie estudiada en los últimos 10 años. Es significativo resaltar que las precipitaciones máximas fueron superiores a 185,0 mm en todos los meses del periodo húmedo llegando hasta 557,0 mm en el mes de septiembre; en cambio, en los meses del periodo seco las precipitaciones alcanzaron valores entre 0,3 y 5,2 mm con la excepción de abril con 20,1 mm.

Tabla 3.5 Estadígrafos fundamentales de la precipitación promedio.

Mes	<i>P_{max}</i> (mm)	<i>P_{min}</i> (mm)	σ (mm)	<i>C_v</i> (%)
Ene.	99,4	5,2	29,3	108,7
Feb.	87,8	0,8	26,7	150,0
Mar.	84,6	2,1	29,9	98,0
Abr.	148,4	20,1	43,9	62,3
May.	369,2	121,9	76,4	32,6
Jun.	399,3	50,0	114,6	63,9
Jul.	185,2	92,1	34,7	25,8
Ago.	307,0	38,7	93,8	63,1
Sep.	557,0	87,5	134,2	66,3
Oct.	264,5	55,1	63,9	41,8
Nov.	259,4	0,3	76,7	134,2
Dic.	87,5	4,4	26,9	83,6
Promedio	237,4	39,9	62,6	77,5

La desviación estándar fue más baja en los meses secos respecto a los meses húmedos con un valor promedio de 62,6 mm y el coeficiente de variación de la serie osciló entre 32,6% a 150,0% con un promedio de 77,5%. Los estadígrafos de la precipitación promedio de los años de la serie fueron los siguientes: precipitación máxima (1571,7 mm); precipitación mínima (1106,2 mm), desviación estándar (148,5 mm) y coeficiente de variación (11,8%).

En cuanto al coeficiente de variación se encontró que el valor obtenido fue inferior al informado por Herrera *et al.* (2018) en una investigación realizada con datos de lluvias diarias ocurridas en la Estación Meteorológica Central de la provincia de Matanzas, donde encontraron valores de 19,0% lo que indica mayor dispersión de los datos de la variable.

3.6 Análisis de la acuosidad estacional e interanual

En la Figura 3.15 se presenta la curva de probabilidad empírica de las precipitaciones mensuales de la serie en los últimos 10 años, la cual responde acertadamente a una función tipo exponencial con elevado coeficiente de determinación ($R^2 = 0,9508$), lo que permite estimar confiablemente la precipitación mensual de la serie en función de su probabilidad con la ecuación:

$$P_{mes} = 356,5e^{-0,03 Prob} \quad (3.15)$$

Donde:

P_{mes} : precipitación mensual (mm).

$Prob$: probabilidad de la lluvia (%).

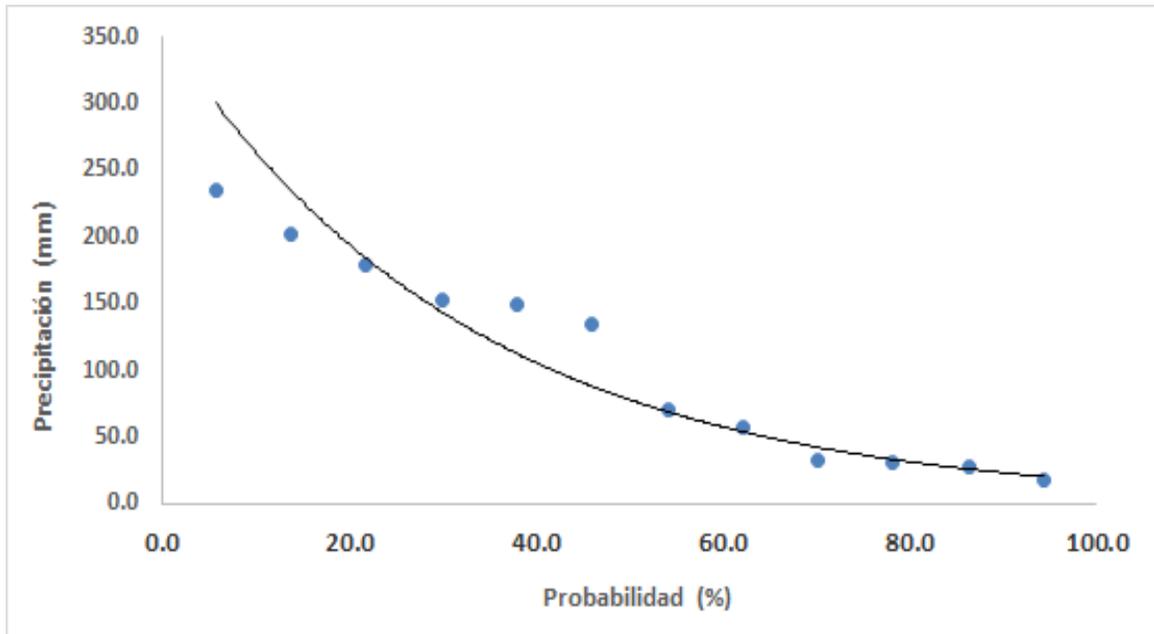


Figura 3.15 Probabilidad empírica de las precipitaciones mensuales.

Los valores de probabilidad permitieron determinar la acuosidad de los meses de la serie de precipitaciones (Tabla 3.6). Los resultados demuestran que, por este criterio, el 50% de los meses fueron normales, *N* (abril, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre), dos fueron húmedos, *H* (septiembre y junio) y dos secos, *S* (marzo y enero). Mayo resaltó como mes muy húmedo, *MH* y febrero como muy seco, *MS*.

En la Figura 3.16 se muestra la curva de probabilidad teórica de las precipitaciones anuales de la serie y a partir de sus valores el comportamiento de la acuosidad de los años estudiados (Tabla 3.7). Estos años se comportaron de la manera siguiente: meses normales (50%), mes húmedo (16,7%), mes muy húmedo (8,3%), mes seco (16,7%) y mes muy seco (8,3%).

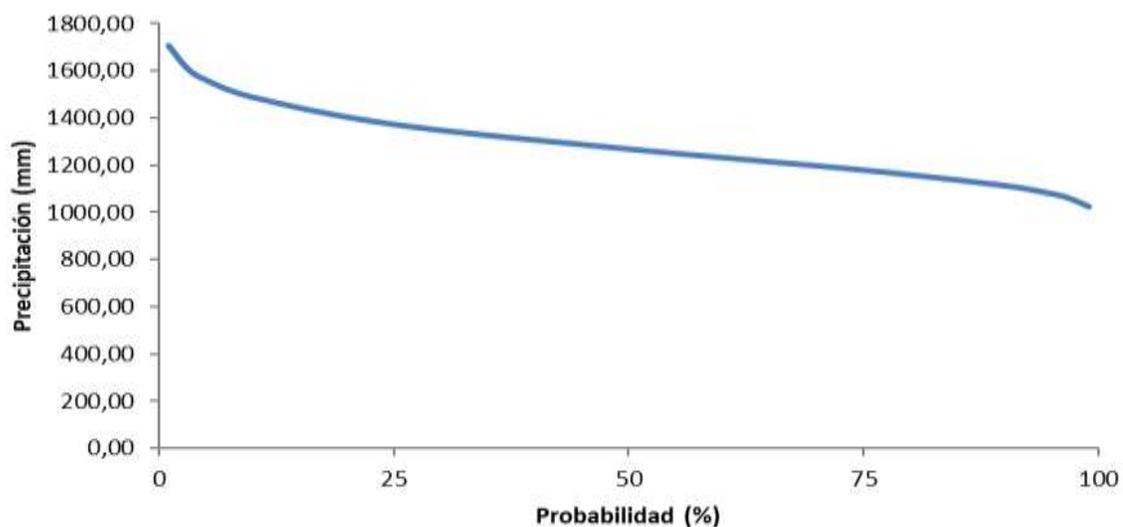


Figura 3.16 Probabilidad teórica de las precipitaciones anuales de la serie.

Tabla 3.6 Acuosidad de los meses según la probabilidad.

Meses	Probabilidad (%)	Clasificación
May.	5,6	MH
Sep.	13,7	H
Jun.	21,8	H
Oct.	29,8	N
Ago.	37,9	N
Jul.	46,0	N
Abr.	54,0	N
Nov.	62,1	N
Dic.	70,2	N
Mar.	78,2	S
Ene.	86,3	S
Feb.	94,4	MS

Tabla 3.7 Acuosidad de los años de la serie según la probabilidad.

Años	Probabilidad (%)	Clasificación
2012	6,7	MH
2017	16,3	H
2016	26,0	N
2020	35,6	N
2011	45,2	N
2019	54,8	N
2013	64,4	N
2014	74,0	N
2018	83,7	S
2015	93,3	MS

3.7 Análisis de los parámetros característicos de la sequía meteorológica

En la Tabla 3.8 se muestran los parámetros estacionales para la caracterización de la sequía meteorológica. Se observa que, en cuatro meses del periodo seco, la magnitud de la sequía (M) fluctuó entre 37,3 mm y 60,9 mm con los valores más bajos en los meses de febrero y diciembre; en el resto de los meses los valores de magnitud estuvieron por encima de 131,0 mm con valores máximos de 250,1 mm y 298,0 mm en los meses de agosto y junio respectivamente. El valor promedio de las variables duración (D), intensidad media (I_m) e intensidad máxima (I_{max}) de la sequía fue de tres años por mes, 45,0 mm año⁻¹ y 67,0 mm año⁻¹ respectivamente.

Tabla 3.8 Parámetros estacionales para la caracterización de la sequía.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
M (mm)	58,4	37,3	60,9	131,7	144,9	298,0	152,1	250,0	211,5	182,3	149,2	49,8
D (años)	4	3	3	3	2	4	5	3	3	3	4	3
I_m (mm año ⁻¹)	14,6	12,4	20,3	43,9	72,5	74,5	30,4	83,3	70,5	60,8	37,3	16,6
I_{max} (mm año ⁻¹)	21,8	17,0	28,4	50,4	112,6	129,4	42,4	109,9	114,9	97,8	56,9	27,8

En la Tabla 3.9 se ofrecen los parámetros interanuales para la caracterización de la sequía meteorológica. En este caso se debe resaltar que la magnitud de la sequía fue superior a 124,0 mm en el 70% de los meses, la duración promedio de la sequía fue de cuatro meses en cada año y las intensidades promedio y máxima sobrepasaron el valor de 39,0 mm mes⁻¹ en el 60% de los meses y 64,0 mm mes⁻¹ en 80% de los meses respectivamente.

Tabla 3.9 Parámetros interanuales para la caracterización de la sequía.

Año	M (mm)	D (meses)	I_m (mm mes ⁻¹)	I_{max} (mm mes ⁻¹)
2011	158,7	4	39,7	64,7
2012	35,4	3	11,8	56,8
2013	124,0	6	20,7	41,2
2014	144,0	3	48,0	73,8
2015	88,7	4	22,2	114,9
2016	182,7	4	45,7	112,6
2017	211,1	4	52,8	95,2
2018	335,9	7	48,0	97,5
2019	151,7	2	75,8	129,4
2020	76,6	4	19,2	109,9

Las Figuras 3.17 y 3.18 muestran la tendencia lineal de la magnitud y duracion de la sequia mensual. En el caso de la magnitud se observa un incremento con pendiente positiva de 8,2 y en la duracion de la sequia practicamente no se percibe evidencias de cambio climatico pues la pendiente es practicamente nula (0,007).

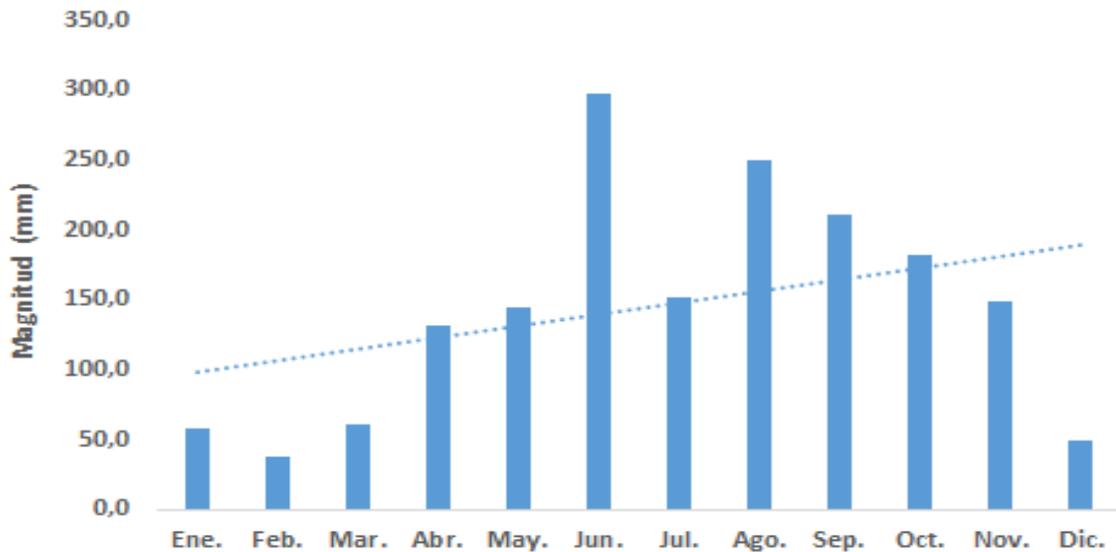


Figura 3.17 Tendencia lineal de la magnitud de la sequia mensual.

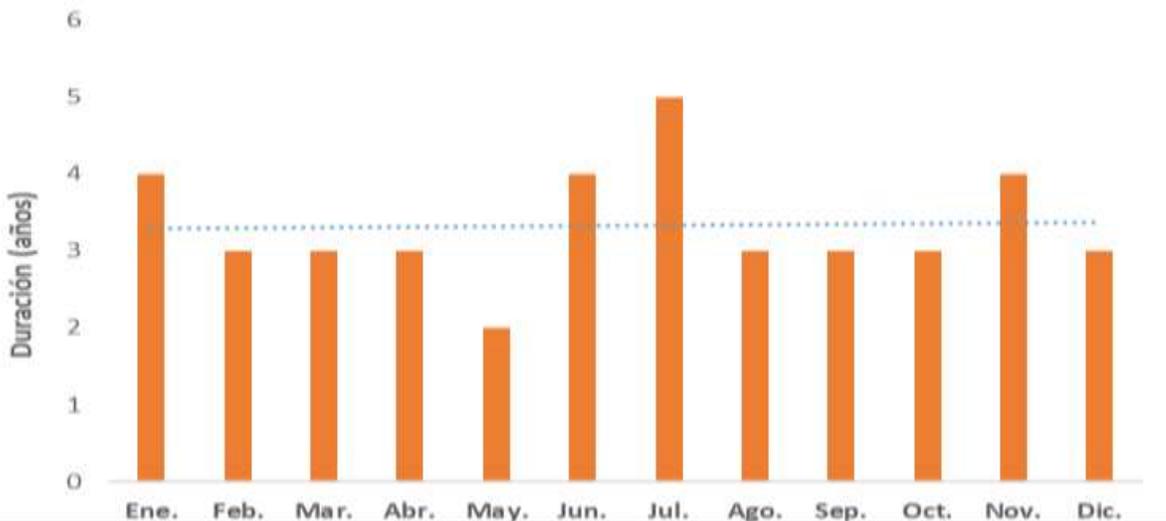


Figura 3.18 Tendencia lineal de la duración de la sequía mensual.

Las Figuras 3.19 y 3.20 manifiestan tendencias similares con pendientes positivas de 8,7 y 0,006 para la magnitud y duracion de la sequia respectivamente. Este comportamiento a los efectos de la presente investigacion constitiye para la magnitud de la sequia una evidencia de cambio climatico.

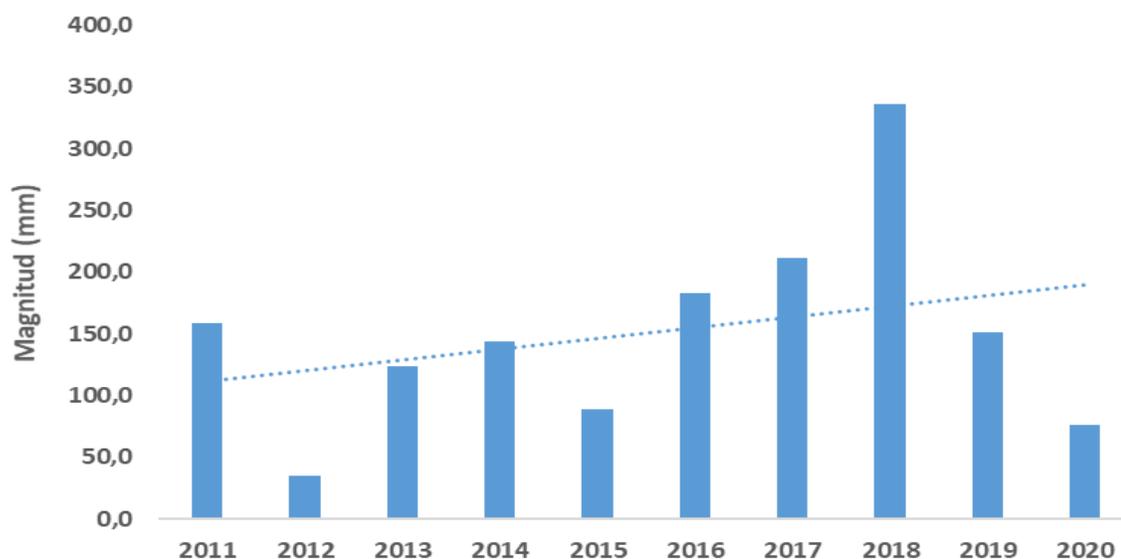


Figura 3.19 Tendencia lineal de la magnitud de la sequía anual.

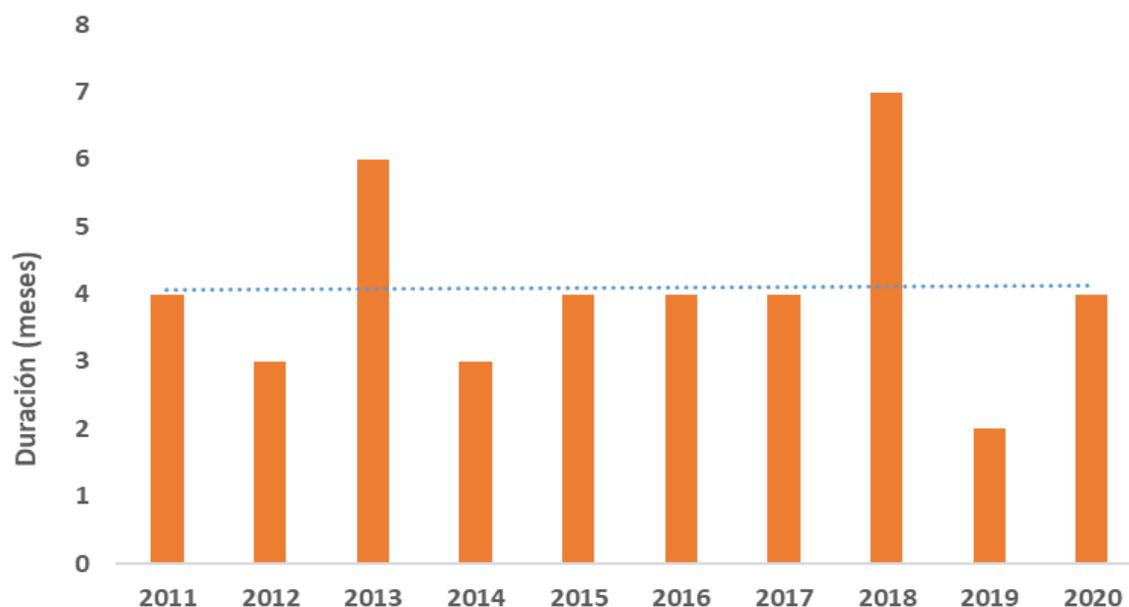


Figura 3.20 Tendencia lineal de la duración de la sequía mensual

Estudios realizados en Cuba y el Caribe afirman que las tendencias climáticas observadas en las últimas décadas muestran un aumento de la frecuencia y la intensidad del fenómeno sequía, por lo que una determinación rápida y acertada de su manifestación en espacio y tiempo resulta esencial para la reducción de los riesgos asociados con esta (Centella *et al.*, 1997; Cutié, 2013; Durán, 2016).

Los resultados mostrados indican que en el municipio Venezuela la sequía tiene un comportamiento periódico con magnitudes, duraciones e intensidades variables. Este comportamiento es similar al encontrado por Bonilla (2014) en estudio realizado en Centroamérica, donde encontró que la sequía es recurrente, atípica y compleja; con impactos sobre los ecosistemas, la disponibilidad del recurso hídrico de fuentes superficiales y subterráneas, la seguridad alimentaria y nutricional y la producción agrícola.

En la Tabla 3.10 se expone el valor de la sequía meteorológica identificada mediante el Índice Porcentaje de Precipitación Normal (PPN) y su clasificación. Los resultados demuestran que, en los últimos 10 años, ocurrió un total de 32 eventos de sequía (27%) lo que representa un promedio de 3,2 sequias por meses. La sequía Severa y Extrema tuvo una incidencia del 16%; mientras que la sequias severa fue sólo el 8% al igual que la sequía extrema.

En esta Tabla los valores superiores a 100% representan meses con superávit de precipitaciones (sin sequía). En este caso los años 2014, 2017 y 2019 contribuyen al logro de mejores resultados desde el punto de vista hidrológico, agroproductivo y ambiental. El Índice Porcentaje de Precipitación Normal es utilizado por diferentes países para el estudio de la sequía. En el caso de España, el Sistema Español de Información sobre el Agua (Hispagua) avala la utilización de este índice el cual relaciona la precipitación acumulada en un periodo de tiempo determinado y la precipitación media anual para una región (Junta de Castilla y León, 2020).

Tabla 3.10 Valor de sequía según el Índice PPN (%) y su clasificación.

Mes/Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Ene.	28	30	56	69	99	369	57	208	65	19
Feb.	11	46	3	326	11	17	103	6	109	29
Mar.	33	72	8	132	26	314	160	62	291	32
Abr.	327	341	169	274	75	112	109	550	480	176
May.	731	1280	717	671	909	452	749	1369	787	1028
Jun.	1331	538	662	694	390	1481	312	656	185	403
Jul.	574	593	687	434	403	376	341	374	671	532
Ago.	311	1138	630	277	679	1045	703	189	393	143
Sep.	665	995	720	555	324	714	2065	519	510	438
Oct.	373	751	520	774	617	204	534	287	628	981
Nov.	143	1	201	170	348	22	184	1	87	962
Dic.	152	41	89	43	219	31	185	91	324	16

3.8 Análisis del índice pluvial para el desarrollo de la agricultura de secano

En la Figura 3.21 se muestra la tendencia del índice pluvial conformado por un ciclo de cuatro meses consecutivos con precipitación acumulada ≥ 300 mm en un intervalo de tiempo anual. Los resultados demuestran que este índice se presenta como promedio 5,7 veces por año con un mínimo de 2 ciclos en el año 2004 y un máximo de 8 ciclos en el año 2003. La tendencia lineal del índice pluvial es negativa con una pendiente muy pequeña de 0,0067 por lo que puede asumirse que no hay evidencias de cambio climático. Las ecuaciones de regresión obtenidas para determinar el valor de la tendencia lineal de este índice es la siguiente:

$$P_{4m} = -0,0067T + 5,8 \quad (3.16)$$

Donde:

P_{4m} : índice pluvial para evaluar potencialidades de la agricultura de secano (mm).

T : Tiempo (años).

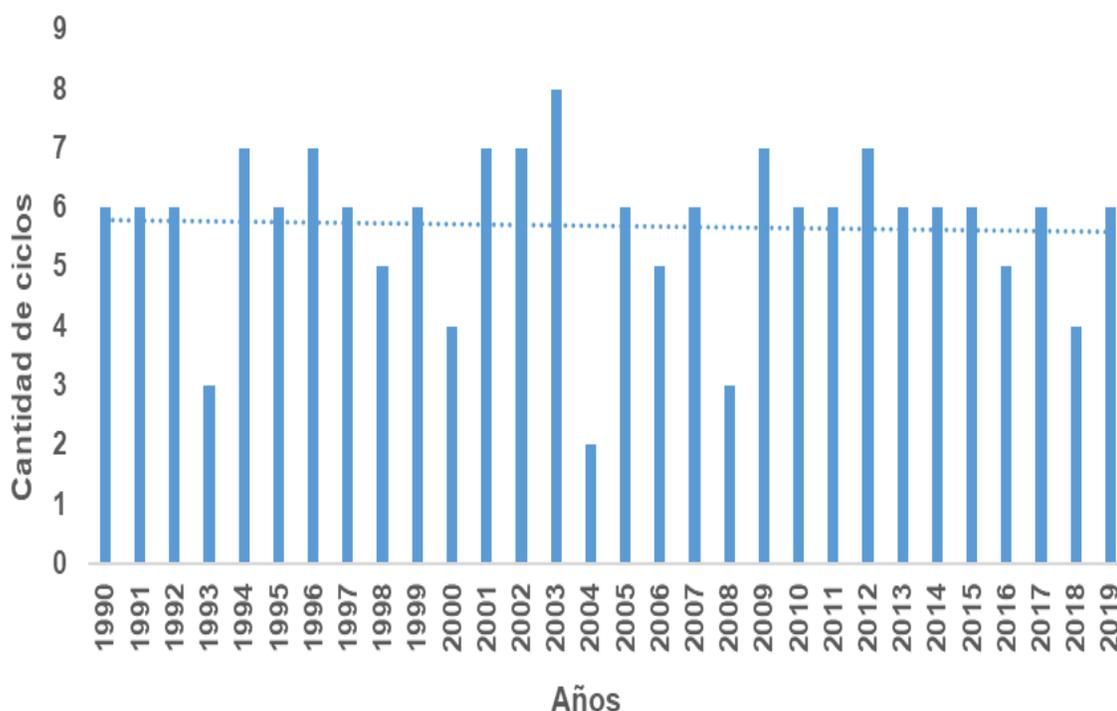


Figura 3.21 Tendencia de la cantidad de ciclos con precipitación ≥ 300 mm.

En la Figura 3.22 se muestra el comportamiento de la precipitación acumulada ≥ 300 mm por ciclos de cuatro meses durante el año 2017. Se observa que en este año ocurrieron seis ciclos; tres en el periodo comprendido de marzo a septiembre y tres en el periodo comprendido de julio a diciembre.

En los ciclos correspondientes al periodo de marzo a septiembre las precipitaciones acumuladas fueron de 315 mm (mar.- jun.), 378 mm (may.-ago.) y 366 mm (jun.-sep.). Estos ciclos presentaron precipitaciones acumuladas ligeramente superiores al límite mínimo de 300 mm, sugerido por Rómulo (2014); pero potencialmente pueden contribuir a la gestión del recurso hídrico pluvial para la producción agrícola en sistemas productivos basado en la agricultura de secano en cultivos de ciclo corto.

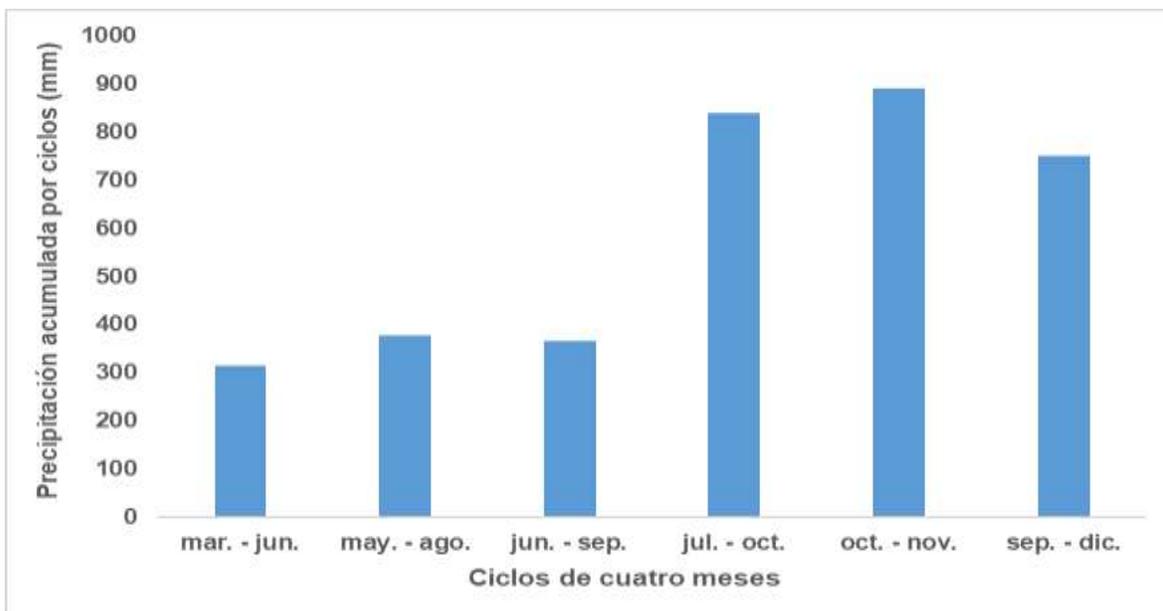


Figura 3.22 Precipitación ≥ 300 mm por ciclos de cuatro meses. Año 2017.

En los ciclos comprendidos desde marzo a septiembre no se incluyen a los meses de enero y febrero por que las precipitaciones son escasas o nulas y para el establecimiento de cultivos de secano la precipitación pluvial es un elemento importante al inicio de la temporada de lluvias (Juan, 2007) y luego durante el período de crecimiento de las plantas para llevarlas al estado de madurez (Rómulo, 2014).

En los ciclos correspondientes al periodo de julio a diciembre las precipitaciones acumuladas fueron superiores a los 700 mm en cada uno de los ciclos, con valores de 839 mm (jul.-oct.), 891 mm (oct.-nov.) y 751 mm (sep.-dic.). Estos ciclos presentaron condiciones de acuosidad favorable; por lo que los riesgos de pérdidas de cosechas se reducen notablemente; no obstante, es importante tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia de inundaciones en el área de cultivo debido a la incidencia de precipitaciones diarias intensas o precipitaciones que pueden suceder en varios días consecutivos.

El análisis del índice pluvial representa una herramienta de gran valor técnico para el diseño de sistemas agroproductivos en cultivos de ciclo corto basado exclusivamente en la utilización del agua de lluvia y para el ahorro de agua y energía en producciones agrícolas sustentadas en sistemas de riego. En cualquiera de los sistemas que se utilice donde el suministro de agua a las plantas sea de forma natural o mediante riego, es necesario que la humedad del suelo se distribuya de la mejor manera posible durante el periodo vegetativo; especialmente en el período de crecimiento del cultivo (Arias, 2008).

3.9 Análisis de los impactos de la investigación en la producción agrícola

En la Tabla 3.7 se demuestra que el año 2017 se comportó hidrológicamente como un año húmedo (*H*) a partir de la valoración de la acuosidad de la serie según la probabilidad teórica de las precipitaciones, y en la tabla 3.10 se observa que este año prácticamente no tuvo incidencia de eventos de sequías. Este comportamiento permitió que se alcanzaran rendimientos beneficiosos con valores de 7,75 t ha⁻¹ en el cultivo de maíz (Brown *et al.*, 2019), lo cual fue demostrado en la investigación realizada en la Finca Tío Pedro del municipio de Venezuela, provincia Ciego de Ávila, Cuba.

La fecha de siembra del cultivo fue el 08/08/2017 y la cosecha el 23/10/2017 como maíz tierno. La precipitación total ocurrida durante el ciclo vegetativo fue de 775,7 mm de los cuales el 20% correspondió al mes de agosto, el 71% al mes de septiembre y el 10% al mes de octubre (Figura 3.23).

El número de días con lluvias en cada uno de los meses fue de 6, 9 y 3 respectivamente para un total de 18 días con lluvias; por lo que el intervalo entre lluvias fue de 4, 2 y 3 días respectivamente para un valor promedio de cuatro días. Este comportamiento de la lluvia demostró que no fue necesario la aplicación de riegos para suplir las demandas hídricas en el cultivo de maíz.

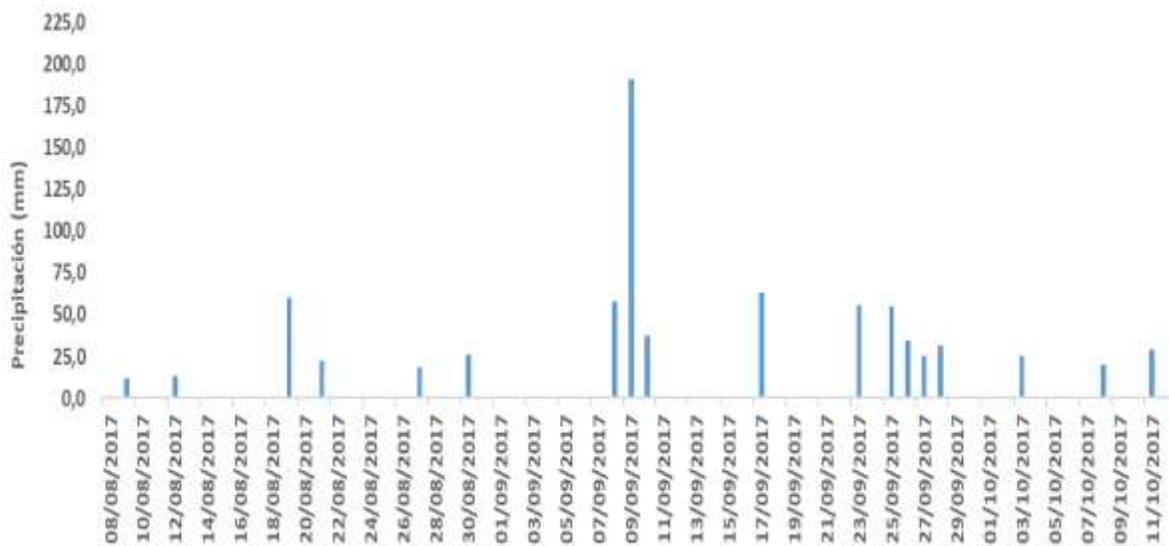


Figura 3.23 Fechas y magnitud de las precipitaciones en el año 2017.

La Comisión Económica para América Latina (CEPAL) considera que la mayor amenaza originada por la sequía es la disminución de la humedad de los suelos, lo cual tiene una elevada relación con la agricultura y específicamente con la producción de granos básicos (CEPAL, 2002). El cambio climático y la sobreexplotación de la tierra pueden agravar los efectos de la sequía sobre los cultivos de maíz y frijol (Bonilla, 2014).

La *Mesoamerican Famne Early Warning System* (MFEWS) opina que la producción de granos básicos requiere hacer coincidir las necesidades de desarrollo de los productos con las condiciones climáticas; pues tanto el déficit hídrico como el exceso pueden afectar el rendimiento del cultivo. En este caso el pronóstico de posibles irregularidades en la precipitación, permite realizar ajustes en las fechas de siembra o de cosecha, para reducir el impacto sobre la producción (MFEWS, 2008).

3.10 Análisis del sistema informático para la evaluación del cambio climático

En esta investigación se desarrolló el software INFO_CLIM en lenguaje de programación *Python* v 3.7.6 (Figura 3.24), el cual se utilizó por tener gran

cantidad de librerías para procesamiento estadístico. Se decidió que la aplicación fuera *web*, debido a que así los investigadores tendrían acceso a la misma fácilmente desde cualquier estación de trabajo, laptops, tabletas o *Smartphone*. Estas estaciones de trabajo son las encargadas de mostrar la respuesta del servidor al cliente sin necesidad de instalar ningún software adicional excepto el navegador, que viene preinstalado en la mayoría de los Sistemas Operativos utilizados en la actualidad.

Para su implementación se decidió utilizar el *framework Django*; debido principalmente a la curva de aprendizaje. *Django* está basado en el patrón arquitectónico Modelo Vista Controlador; sin embargo, utiliza el patrón Modelo-Vista-Template; es decir:

- Modelo: manipula los datos de la aplicación.
- Template: decide cómo se van a mostrar los datos en el navegador.
- Vista: decide que datos va a mostrar el *Template*.

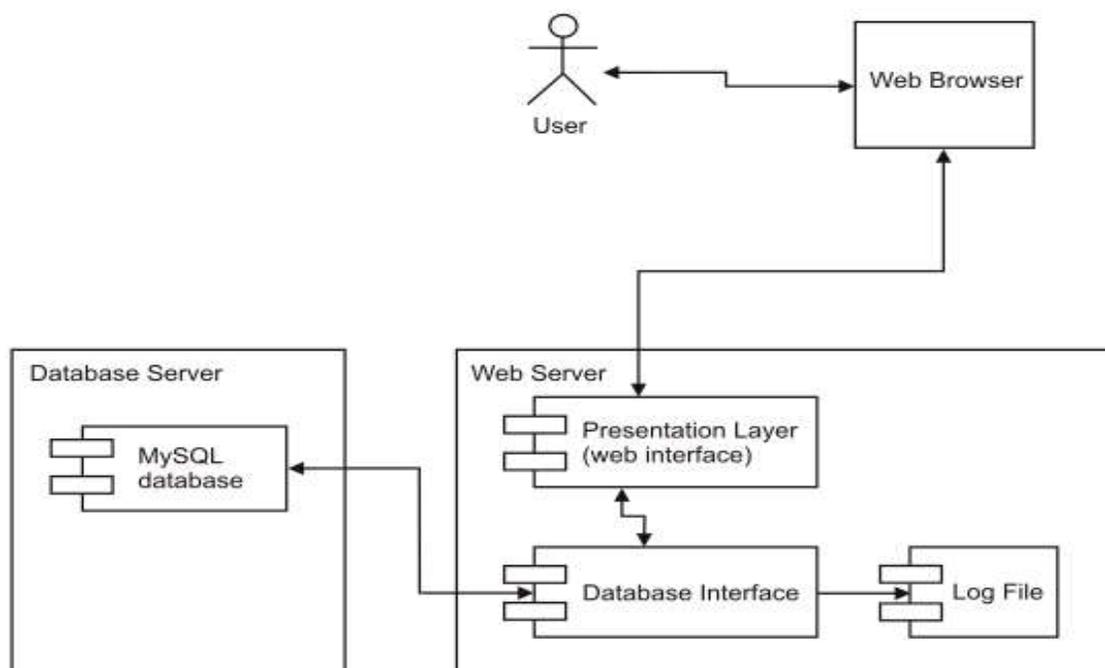


Figura 3.24 Componentes que forman parte del despliegue de la aplicación.

Una vez desplegada la aplicación, se puede acceder a la misma utilizando un mecanismo de autenticación basado en usuarios y roles. Cada usuario autorizado deberá pertenecer a uno o varios de los roles definidos a continuación:

- Administrador del sistema: solo tiene acceso a la asignación de roles a los usuarios.
- Administrador climático: tiene permisos para modificar y crear, todo lo relacionado con la configuración de los parámetros del sistema. Puede solicitar además informes sobre las mismas, pero solo en modo lectura.
- Especialista: puede solicitar todos los tipos de reportes que maneja el sistema. Tiene además permisos para modificar los parámetros meteorológicos, independientemente de los valores encontrados.

En la Figura 3.25 se muestra la interfaz principal, la cual aparece una vez que se accede al sistema mediante el navegador; dado el rol determinado se accede al interior de la aplicación.



Figura 3.25 Interfaz principal de sistema INFO_CLIM.

Cuando el usuario ingresa a la página, cuenta con distintas funciones a realizar como añadir, modificar y eliminar información relacionada con los municipios, además de contar con una interfaz que permite ver todos los municipios (Figura 3.26).

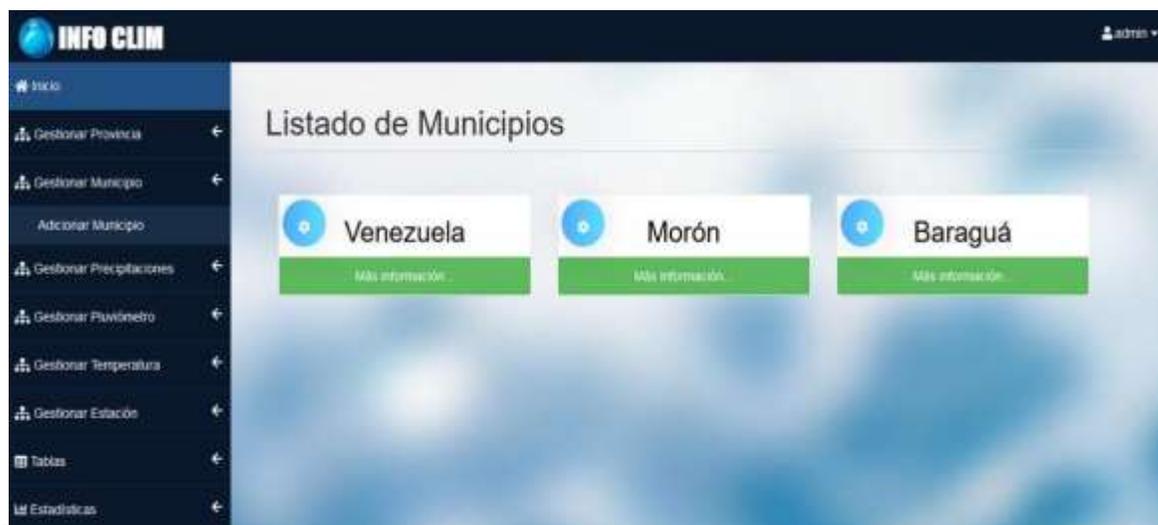


Figura 3.26 Interfaz de selección de los municipios INFO_CLIM.

Cuando el usuario ingresa dentro de un pluviómetro específico, puede introducir y guardar todos los datos relacionados con las precipitaciones diarias (Figura 3.27). En este caso el usuario puede introducir la fecha en que se produjo el evento de precipitación, la provincia, el municipio y el código del equipo pluviométrico.



Insertar Precipitación

Precipitación

Fecha

Provincia

Municipio

Pluviómetro

Figura 3.27 Interfaz de entrada de los datos registrados en los pluviómetros.

En la Figura 3.28 se muestra la interfaz de datos de precipitaciones introducidos en el sistema INFO_CLIM. En esta figura se observa un ejemplo de los datos correspondientes a siete eventos de precipitaciones ocurrido en la provincia de Ciego de Ávila, municipio Venezuela con magnitud de 26,7; 0,0; 0,2; 52,3; 0,7; 15,1 y 0,2 mm en las fechas de 9 de abril de 2019, 8 de marzo de 2019, 9 de mayo de 2019 y 9 de julio de 2019, 9 de septiembre del 2019, 9 de noviembre del 2019 y 29 de diciembre del 2019 respectivamente.

Todos los datos insertados al sistema INFO_CLIM pasan por una transformación algorítmica que le permite al usuario conocer de manera rápida el promedio mensual y promedio anual (Figura 3.29).

Precipitaciones

1994-01-01 2022-06-30

Mostrar 15 registros

ID	PLUVIOMETRO	ESTACION	MUNICIPIO	PROVINCIA	PRECIPITACION	FECHA	
1314	CAVY-01	La Loma	Venezuela	Ciego de Ávila	1.3	1994-01-01	<input type="button" value="I"/>
1315	CAVY-01	La Loma	Venezuela	Ciego de Ávila	0	1994-01-02	<input type="button" value="I"/>
1316	CAVY-01	La Loma	Venezuela	Ciego de Ávila	10.5	1994-01-03	<input type="button" value="I"/>
1317	CAVY-01	La Loma	Venezuela	Ciego de Ávila	0	1994-01-04	<input type="button" value="I"/>
1318	CAVY-01	La Loma	Venezuela	Ciego de Ávila	0	1994-01-05	<input type="button" value="I"/>
1319	CAVY-01	La Loma	Venezuela	Ciego de Ávila	0	1994-01-06	<input type="button" value="I"/>

Activar WebSockets
Ve a Configuración para activar WebSockets

Figura 3.28 Interfaz de datos de precipitaciones introducidos en el sistema.

INFO CLIM admin

Inicio

- Gestionar Provincia
- Gestionar Municipio
- Gestionar Precipitaciones
- Gestionar Pluviómetro
- Gestionar Temperatura
- Gestionar Estación
- Tablas
- Estadísticas

Precipitación por mes y año

Año	Ene	Feb	Marz	Abr	Mayo	Junio	Julio	Agost	Sept	Oct	Nov	Dic	P(año)
2018	42.2	1.5	16.6	113.1	18.2	77.0	0.3	0.6	86.0	13.9	0.3	16.6	388.3
2019	17.4	25.4	74.5	129.5	189.2	50.0	181.0	106.1	86.7	126.4	15.7	87.2	1069.1
Promedio del mes P(mes)	29.8	13.5	45.6	121.3	103.7	63.5	90.7	53.4	87.4	70.2	8.0	51.9	738.7

Mostrando registros del 1 al 3 de un total de 3 registros

Mostrar 10 registros

Figura 3.29 Reporte de datos de precipitaciones.

El programa INFO_CLIM, a partir de los datos de precipitaciones diarias almacenados puede realizar la desestacionalización de la serie cronológica para posteriores estudios ya que este proceso garantiza la calidad de los datos de precipitaciones que se utilizarán para estudios hidrológicos o proyectos

hidráulicos; pudiéndose contar con una serie de precipitaciones sin variaciones anómalas que contribuye al logro de mayor veracidad en el proceso de pronóstico. (Figura 3.30).



Figura 3.30 Reporte gráfico de precipitaciones desestacionalizadas.

El programa INFO_CLIM, calcula de manera rápida y precisa el climograma de Gausson de una localidad (Figura 3.31), la curva acumulativa de las precipitaciones para diferentes periodos anuales (Figura 3.32), el patrón de desplazamiento de las precipitaciones para diferentes periodos anuales (Figura 3.33), las anomalías de las precipitaciones para diferentes periodos anuales (Figura 3.34) y otros indicadores de cambios climáticos definidos en esta investigación.

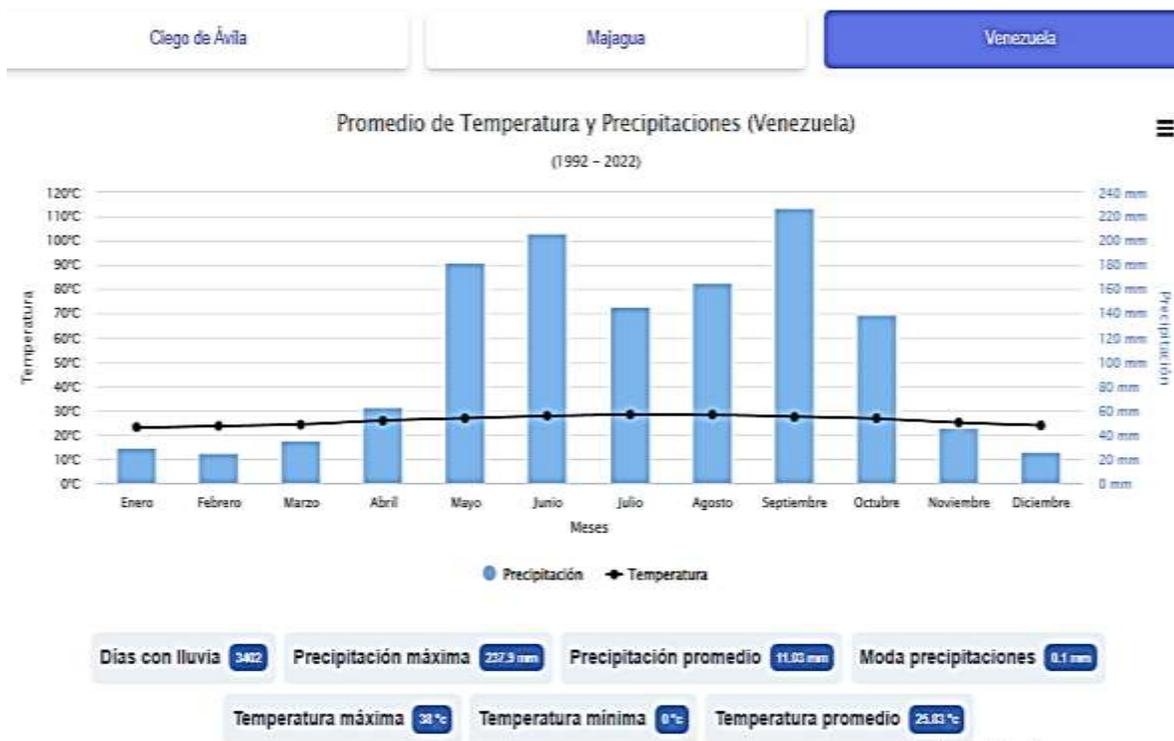


Figura 3.31 Interfaz de creación del climograma en el sistema INFO_CLIM.

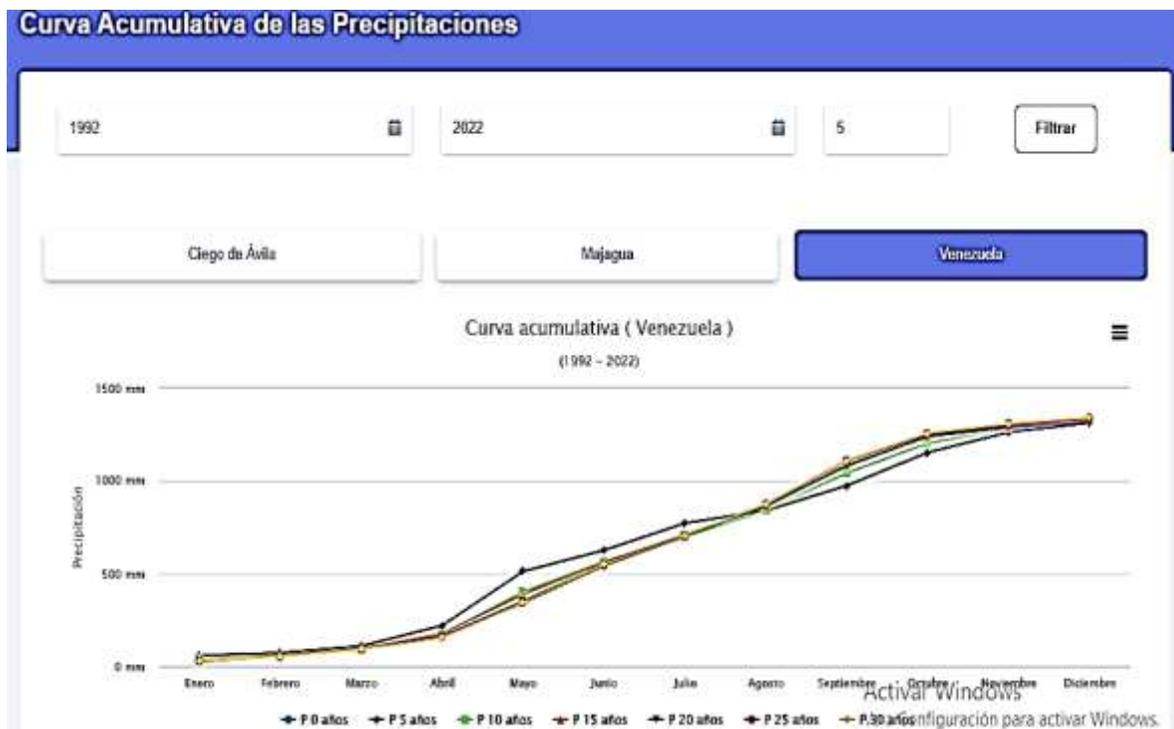


Figura 3.32 Reporte de curvas acumulativas en el sistema INFO_CLIM.



Figura 3.33 Reporte de patrones de desplazamiento en el sistema **INFO_CLIM.**

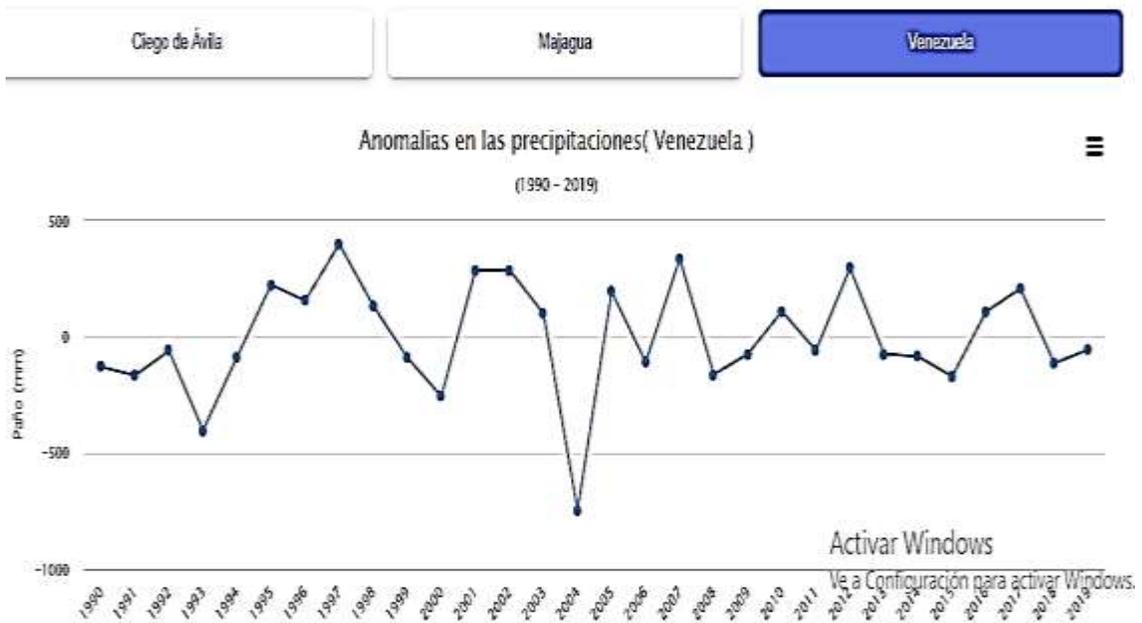


Figura 3.34 Reporte de anomalía en las precipitaciones en el sistema.

El desarrollo de esta investigación representa una contribución económica significativa para el país, puesto que los especialistas relacionados con el

aprovechamiento de los recursos hídricos y el diseño de obras hidráulicas podrán contar con datos de precipitaciones desestacionalizadas las cuales aportan mayor seguridad en el funcionamiento de las estructuras destinadas a la captación, transporte, almacenamiento y derivación del agua; así como ahorros de agua y energía (Brown *et al.*, 2015; Hernández y Brown, 2021). Los resultados expuestos han sido validados e introducidos en la Empresa de aprovechamientos Hidráulicos de la provincia Ciego de Ávila y se cuenta con un aval de los resultados compartidos con los especialistas de esa entidad (Anexo I).

3.11 Conclusiones parciales

- El municipio Venezuela se caracteriza por tener un régimen hídrico con precipitación anual de 1253 mm, siendo los meses de septiembre y junio los más pluviosos con 227 mm y 212 mm respectivamente. Su régimen térmico presenta una temperatura máxima media del mes más cálido (julio) de 28,2 °C y una mínima media del mes más frío (enero) de 23,0 °C.
- Las precipitaciones de los meses del periodo húmedo representan el 84% del total anual.
- El índice de Gausson utilizado para la determinación del Índice de Aridez demostró que los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, marzo y abril tienen categoría de seco. Estos se clasificaron como mes seco severo (diciembre, febrero y enero), mes seco fuerte (marzo y noviembre) y mes seco incipiente (abril).
- Se encontró una tendencia lineal positiva en las precipitaciones anuales, las precipitaciones del periodo húmedo, las precipitaciones del periodo seco, el número de días con lluvias anuales, el número de días con lluvias en el periodo húmedo.
- El número de días con lluvias en el periodo seco mostró una tendencia lineal nula y la temperatura media del periodo seco manifestó una tendencia lineal negativa.

- La curva sumaria detectó los mayores cambios climáticos en la precipitación acumulada de los últimos cinco y diez años.
- El patrón de desplazamiento identificó los cambios climáticos más notables en la precipitación y el número de días con lluvias en los últimos cinco años.
- Las anomalías climáticas permitieron encontrar cambios climáticos en las variables estudiadas. Estos cambios presentan tendencias positivas en las precipitaciones anuales, el número de días con lluvias y la temperatura media anual; sin embargo, presenta tendencia negativa en el caso de la humedad relativa.
- El 50% de los meses en el municipio Venezuela tuvieron un comportamiento normal desde el punto de vista hidrológico; sin embargo, mayo fue un mes muy húmedo y febrero muy seco.
- La magnitud de la sequía fue superior a 124 mm en el 70% de los meses, la duración promedio fue de cuatro meses en cada año y las intensidades promedio y máxima sobrepasaron el valor de 39,0 mm mes⁻¹ en el 60% de los meses y 64,0 mm mes⁻¹ en 80% de los meses respectivamente.
- La magnitud de la sequía meteorológica mostró un incremento con pendiente positiva de 8,2; mientras que la duración prácticamente no experimentó cambios pues la pendiente es prácticamente nula (0,007).
- En los últimos 10 años, ocurrió un total de 32 eventos de sequía meteorológica (27%) lo que representa un promedio de 3,2 sequias por meses. La sequía Severa y Extrema tuvieron una incidencia del 16%.
- El índice pluvial representa una herramienta de gran valor técnico para el diseño de sistemas agroproductivos para el desarrollo de cultivos de ciclo corto basado exclusivamente en la utilización del agua de lluvia y para el ahorro de agua y energía en producciones agrícolas sustentadas en sistemas de riego.
- Los resultados de la investigación sugieren la necesidad de fortalecer el pronóstico hidrológico para contribuir al aprovechamiento de los recursos hídricos pluviales en la producción agrícola. Se pudo demostrar que el año 2017, definido como hidrológicamente húmedo permitió que se alcanzaran

rendimientos satisfactorios en el cultivo de maíz sustentados en el aprovechamiento del agua de lluvia.

- El desarrolló el software INFO_CLIM constituye una herramienta novedosa para el análisis de las evidencias de cambio climático sustentado en indicadores y contribuye a la gestión de los recursos hídricos en la agricultura.

CONCLUSIONES

- El análisis de tendencia demostró evidencias de cambios climáticos por incremento de las precipitaciones anuales, las precipitaciones del periodo húmedo, las precipitaciones del periodo seco, el número de días con lluvias anuales, el número de días con lluvias en el periodo húmedo y por disminución la temperatura media del periodo seco.
- La curva sumaria de las precipitaciones acumuladas mostró los mayores cambios climáticos en de los últimos cinco y diez años; mientras que el patrón de desplazamiento identificó los cambios climáticos más notables en las precipitaciones acumuladas y el número de días con lluvias en los últimos cinco años.
- Las anomalías climáticas mostraron evidencias de cambios climáticos por incremento de las precipitaciones anuales, el número de días con lluvias y la temperatura media anual; así como por reducción de la humedad relativa.
- El climograma construido para el municipio de Venezuela demuestra que diciembre, febrero y enero se clasifican como meses secos severos; marzo y noviembre como meses secos fuertes y abril como mes seco incipiente.
- La magnitud de la sequía meteorológica mostró tendencia a incrementarse en los últimos 10 años; mientras que su duración no experimentó cambios en ese periodo evaluado.
- El índice pluvial mostró que la utilización exclusiva del agua de lluvia para la producción agrícola de cultivos de ciclo corto es una alternativa a partir del

análisis hidrológico de periodos de cuatro meses que presenten precipitaciones acumuladas igual o superior a 300 mm.

- El software INFO_CLIM permite calcular las evidencias de cambio climático en una determinada localidad de forma rápida y precisa. Su validación práctica fue demostrada mediante el aval de satisfacción de la Empresa de Abastecimiento Hidráulico de la provincia Ciego de Ávila.

RECOMENDACIONES

- Mantener una actualización sistemática de la base de datos de precipitaciones, número de días con lluvias, temperaturas y humedad relativa para que los resultados que se persiguen reflejen efectivamente la situación climatológica de la localidad.
- Profundizar en la determinación del índice pluvial y su comprobación en la práctica agrícola que permita la toma de decisiones acertadas sobre los periodos más convenientes de aplicación los sistemas de secano con el menor riesgo de pérdidas de cosecha posible.
- Utilizar el software INFO_CLIM para la determinación de las evidencias de cambio climático y la evaluación de los impactos sobre los recursos hídricos pluviales en una determinada localidad.
- Divulgar mediante cursos de capacitación y otras vías efectivas los resultados obtenidos en esta investigación que permita a los productores locales la caracterización del clima mediante el Climograma y calcular mediante indicadores las evidencias de cambio climático y sus efectos sobre los recursos hídricos pluviales. Estos conocimientos contribuirán a potenciar la agricultura de secano en lugares sin infraestructura de riego.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACC II. (2005). Estudio de la vulnerabilidad actual (versión preliminar) Guatemala. Estudio de caso: subcuenca de río San José. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Editorial PNUD.
- Alcántara, A., Montalvo, N., Mejía, A., & Ingol, E. (2014). Validación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para su aplicación a la cabecera de cuenca del río Jequetepeque. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 17(33), 1-10.
- Alexandre, M. J. O., García, F. F., & Nunes, E. (2013). Las oscilaciones climáticas en la atmosfera urbana de la ciudad de Natal, Brasil a través de las series largas de temperaturas del aire. *HOLOS*, 5, 137-156.
- Alfaro, E. M., & Santos, A. (2012). Cómo sacar información. Las pegs en la interpretación del comportamiento a través de los icnofósiles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20(2), 141-141.
- Aranguren, M. (2009). Pronósticos de madurez y otras especificaciones de calidad para el ordenamiento de la cosecha en los cítricos de Jagüey Grande (Tesis de Doctorado). Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical, La Habana, Cuba.
- Aranguren, M., Pérez, J., & Pérez, Y. (2015). Determinación de los índices bioclimáticos y tipo de clima para la vid en las condiciones de Jagüey Grande, Matanzas, Cuba. *Centro Agrícola*, 42(4), 75-83.

- Areces, A. J., Barranco, G., & Sánchez, J. (2020). Efectos potenciales del Cambio Climático en cuencas hidrográficas de los ríos Bacuranao y Guanabo , Cuba: Visión prospectiva. *Revista Cubana De Geografía*, 2(1). Recuperado de <https://revistasgeotech.com/index.php/rcg/article/view/317>
- Arias, E. S. (2008). Diagnóstico de rendimientos de caña de azúcar utilizando factores climatológicos múltiples (Tesis de Pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
- Arias, R., Sánchez, L., & Rodríguez, M. (2020). Pobreza y desigualdad en Costa Rica: una mirada más allá de la distribución de los ingresos. *Revista Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, 8(1), 1-6.
- Arrastía, M. A., & Limia M. E. (2011). *Energía y Cambio Climático*. Empresa de Gestión del Conocimiento y la Tecnología. La Habana, Cuba: Editorial Academia.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2008). *El Cambio Climático y el Agua*. Ginebra, Suiza: IPCC.
- Batista, J. L. (2019). Los trasvases en el archipiélago cubano. *Revista Voluntad Hidráulica*, 129, 41-47.
- Bhalme, H. N., & Mooley, D. A, (1980). Large Scale drought/flood and monsoon circulation, *Monthly Weather Review*, 108, 1179 - 1211.
- Blanco, E. (2021). Sistema de Gestión de Sequía para la mitigación y adaptación de los impactos negativos en áreas agrícolas del municipio Venezuela de la provincia Ciego de Ávila (Tesis de Doctorado). Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba.
- Bolaños, J. I. (2017). La enseñanza y el aprendizaje del cambio climático en el aula (Tesis de Maestría). Universidad de La Laguna, Canarias, España.

- Bonilla, A. (2014). Patrones de sequía en Centroamérica. Su impacto en la producción de maíz y frijol y uso del Índice Normalizado de Precipitación para los Sistemas de Alerta Temprana. Tegucigalpa, Honduras: Editorial GWP Centroamérica y la Cooperación Suiza.
- Brown, O., Gallardo, Y., Correa, A., & Barrios, S. (2015). El cambio climático y sus evidencias en las precipitaciones. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(1), 88-101.
- Brown, O., Gallardo, Y., & Peña, M. (2019). Impactos de la carrera ingeniería hidráulica en el contexto de la Tarea Vida en la provincia Ciego de Ávila. *Revista Universidad&Ciencia*, 8(ESP), 882-895.
- Burba, J. L., & Cavagnaro, M. (2021). Aplicaciones prácticas del uso de climogramas para el cultivo de ajo en Mendoza. Mendoza, Argentina: Editorial Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Burroughs, W. (2007). *Climate Change A Multidisciplinary Approach (Second Edition)*, Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Caballero, M., Lozano, S. y Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las Ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitario*, 8(10),2-12.
- Camarasa, V. (2009). Cómo se comenta un climograma y ejercicios para practicar. Recuperado de <http://vicentecamarasa.wordpress.com>
- Campos, D. F. (2014). Modelación del proceso precipitación-escurrimiento mensual por medio de regresiones. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 15(4), 625-636.
- Celeiro, M. (2001). Clima histórico de Cuba: contribución al transecto PEP-I del PAGES. *Investigaciones geográficas*, (46), 15-29.

- Centella, A., Naranjo, L. R., & Paz, L. R. (1997). Variaciones y cambios del clima en Cuba. La Habana, Cuba: Editorial del Instituto de Meteorología.
- Centella, A. (2019). Los Modelos Climáticos y la Estimación del Clima Futuro. La Habana, Cuba: Editorial AMA.
- CEPAL. (2002). La sequía de 2001 en Centroamérica. México: Editorial Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Challenger, I., Díaz, Y., & Becerra, R. A. (2014). El lenguaje de programación Python. Ciencias Holguín, 20(2), 1-13.
- Chávez, M. O. (2018). Variaciones de la temperatura y precipitación como indicadores del cambio climático en el Distrito de Pedro Gálvez, Provincia de San Marcos, Cajamarca. Congreso Internacional sobre gestión y Tratamiento Integral del Agua. Recuperado de <file:///C:/Users/Brown/Downloads/3004-Texto/Articulo-5889-1-10-20220613.pdf>
- Chitarroni, H. (2002). El análisis de las series cronológicas. Instituto de Investigación en Ciencias Sociales. San Salvador: Editorial Universidad del Salvador.
- CITMA. (2011). El Cambio Climático y la Zona Costera Cubana. Nuestros Científicos. Alertan...”. Resumen Anual de los Resultados del Macroproyecto. Peligros y Vulnerabilidad Costera. La Habana, Cuba: Editorial Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.
- Cuba Tesoro. (2022). Municipio de Venezuela – Ciego de Ávila. Recuperado de <https://www.cubatesoro.com/municipio-venezuela/>
- Cutié, V. (2013). La sequía en Cuba, un texto de referencia. La Habana, Cuba: Editorial Instituto de Meteorología.

- Cutié, V., & Lapinel, B. (2013) La sequía en Cuba, un texto de referencia. La Habana, Cuba: Editorial del Instituto de Meteorología.
- Del Valle, J. (2014). El cambio climático: reflexiones tras la cumbre de Varsovia. Instituto Español de Estudios Estratégicos. Madrid, España: Ministerio de Defensa del Gobierno de España.
- Duque, A. J. (2018). El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(2), 46-59.
- Durán, I. (2016). Cantidad de días con lluvia y su distribución por intervalos en condiciones normales y de sequía severa en el occidente de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 22(1), 49-65.
- Durán, I. (2017). Circulación atmosférica y días con lluvia durante eventos significativos de sequía en el occidente de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(3), 349-362.
- Elías, F., & Castellví, F. (1996). Agrometeorología. Madrid, España: Editorial Mundi-Prensa.
- Estrada, M. (2001). Cambio climático global: causas y consecuencias. *Revista de información y análisis*, 16, 7-17.
- FAO. (2015). AQUASTAT Perfil de País - Cuba. , Roma, Italia: Editorial Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Feldmann, F. J., & Biderman, R. (2001). Los cambios climáticos globales y el desafío de la ciudadanía planetaria. *Acta Bioethica*, 7(2), 25-36.
- Fernández, M. E. (2013). Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sectores. Evaluación del riesgo agroclimático por sectores. Bogotá, Colombia: Editorial FONADE- IDEAM.

- Fleming, J. (1998). *Historical Perspectives On Climate Change*, New York, USA: Oxford University Press.
- Galindo, L. M., Samaniego, J. L., Alatorre, J. E., & Carbonell, J. F. (2014). *Reflexiones metodológicas del análisis del cambio climático. Una visión desde América Latina*. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Gallardo, Y. (2015). *Sistema de Gestión de Sequía para la mitigación y adaptación de los impactos negativos en áreas agrícolas del municipio Venezuela de la provincia Ciego de Ávila (Tesis de Doctorado)*. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba.
- Gan, A., Gan, W. A., & Figueroa, A. N. (2008). Exactitud y precisión en ingeniería. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(12), 89-97.
- García, D., Durán, I., & Lapinel, B. (2020). Cantidad de días con lluvia y eventos significativos de sequía en el centro de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(1), 1-14.
- García, F. P. (2010). *Modelación hidrológica estocástica: desarrollo de un modelo de generación sintética de series temporales*. Santa Cruz, Bolivia: Editorial Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno.
- Gómez, Y. L. (2016). *Distribución espacial y temporal del coeficiente de concentración de la precipitación diaria en el municipio de Venezuela, provincia de Ciego de Ávila (Tesis de Pregrado)*. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba.
- González, J., & Domínguez, H. M. (2019). Distribución espacial de los recursos hídricos en Cuba. En *Proyección estudios geográficos y de ordenamiento territorial* Vol. XIII, 26, 136 - 156.

- González, D., Garrote, L., & Iglesias, A. (2013). Análisis hidrológico de los escenarios de cambio climático en España. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 11, 29-41.
- González, F. (2018). Metodología para monitoreo de la recuperación del manglar en la desembocadura del río San Cristóbal. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 6(2), 240-256.
- González, M. P., Di Pietro, L., González, M. F., Argerich, M., & Castillo, N. (2020). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático para la gestión y planificación local. Argentina. Recuperado de <file:///C:/Users/Brown/Downloads/ManualVulnerabyAdap.pdf>
- González, M., Jurado, E., Gonzales, E., Aguirre, O., Jiménez, J., & Navar, J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Revista Ciencia UANL*, (3), 377-35.
- Grünwaldt, A., Valencia, S., & Ferreira, I. (2010). La ciencia del cambio climático. Manual práctico para tomadores de decisiones en Mesoamérica. Washington, D.C., Estados Unidos: Editorial Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Hernández, D., Vega, A., Zamora, A., & Sierra, P. C. (2019). El cambio climático y los impactos socioeconómicos sobre la zona costera e insular colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 48(2), 9-32.
- Hernández, M., Peña, F., & Gonzáles, L. E. (2016). Análisis del proceso de beneficio del cieno carbonatado. *Tecnología Química*, 36(1), 53-66.
- Hernández, P. O. (2021). El cambio climático y las implosiones del ser humano. *Serrana Boletín Científico De La Escuela Preparatoria Ixtlahuaca*, 3(5), 11-14.

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). Metodología de la investigación. Cuarta edición. Ciudad de México, México: Editorial McGraw-Hill.
- Hernández, Y., & Brown, O. (2021). Tecnología de la información en los recursos hídricos superficiales como herramienta de la transformación social. En Una mirada a la investigación y a la responsabilidad social. Lima, Perú: Editorial Municipalidad Metropolitana de Lima
- Herrera, L. L. (2014) RClimTool manual de usuario. Clima y sector agropecuario colombiano, Colombia. Recuperado de <https://blog.ciat.cgiar.org/es/rclimtool-una-aplicacion-libre-para-el-llenado-y-analisis-de-datos-de-clima/>
- Herrera, R. S., García, M., Cruz, A. M., & Romero, A. (2018). Estudio del régimen de precipitaciones pluviales en dos áreas del Instituto de Ciencia Animal. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 22(1), 7-17.
- ICC. (2016). Sistema de Alerta Temprana –SAT– para inundaciones. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), Guatemala: Editorial: Universidad Galileo.
- IFPRI. (2009). Cambio Climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Washington D.C., Estados Unidos: Editorial del Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias.
- Iglesias, A., Estrela, T., & Francesc Gallart, F. (2019). Impactos del cambio climático en España. Impactos sobre los recursos hídricos. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/07_recursos_hidricos_2_tcm30-178498.pdf
- INAMHI. (2008). Estudios e investigaciones meteorológicas. *Boletín Meteorológico Mensual*, 33(2), 1-12.

- INSMET. (2015). Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático. La Habana. Cuba: Editorial Instituto de Meteorología.
- IPCC. (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza: IPCC.
- IPCC. (2022). La evidencia es clara: ahora es el momento de actuar. De aquí a 2030 podemos reducir las emisiones a la mitad. Comunicado de prensa del IPCC. Recuperado de <https://reliefweb.int/report/world/la-evidencia-es-clara-ahora-es-el-momento-de-actuar-de-aqui-2030-podemos-reducir-las>
- IUSS Grupo de Trabajo WRB (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos. Roma, Italia: Editorial FAO.
- Juan, J. I. (2007). Manejo del ambiente y riesgos ambientales en la región fresera del estado de México. Biblioteca Virtual de Derecho, Economía y Ciencias Sociales. Recuperado de <http://www.eumed.net/libros-gratis/2007a/235/235.zip>
- Junta de Castilla & León. (2020). Sistema de Indicadores Ambientales y de Sostenibilidad. Periodos de Sequía. Medio ambiente de Castilla y León. Recuperado de <https://medioambiente.jcyl.es/web/es/planificacion-indicadores-cartografia/periodos-sequia.html>
- Juventud Rebelde (2011). Aumentan los incendios en bosques cubanos.

Recuperado de <https://www.juventudrebelde.cu/cuba/2011-06-24/aumentan-los-incendios-en-bosques-cubanos>

Labraga, J. C., Brandizi, L. D., & López, M. A. (2011). Avances en el pronóstico climático de las anomalías de lluvia en la Región Pampeana. *Meteorológica*, 36(2), 59-71.

Laguardia, J. (2020). Cuba's Response to Climate Change: Mitigation Lessons from Caribbean SIDS. *Handbook of Climate Change Management: Research, Leadership, Transformation*. Recuperado de <https://westindiesstaugustine.academia.edu/JacquelineLaguardia>

Lapinel, B., & Planos, E. (2002). Visión de la sequía en Mesoamérica y el Caribe: Diagnóstico, impactos y mitigación. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. Recuperado de <http://www.met.inf.cu/sequia/contribuciones/feria1.htm>

Lima, H., Cornide, M. T., Álvarez, M., & Frómeta, E. (1988). Clasificación edafoclimática de las localidades cítrícolas en Cuba. *Agrotécnica de Cuba*, 20 (2), 63-74.

Lobos, G., & Muñoz, T. (2005). Índices de estacionalidad de los precios medios recibidos por los productores de manzanas chilenas. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 40(11), 1051-1057.

Madrigal, O., Brown, O., Luis, D., Gallardo, Y., & Castellanos, L. (2019). Análisis del consumo de agua y energía en el riego por surcos. *Revista de Ciencia y Tecnología (RECyT)*, 21(32), 16-21.

Maenza, R. A., & Compagnucci, R. H. (2010). Simulación de la pequeña edad de hielo usando el modelo EdGCM. *Revista Geoacta*, 35, 78-91.

Martínez, D. D. (2013). Situación didáctica y posibilidades del climograma como recurso digital. *Didáctica Geográfica*, 14, 53-68.

- Mercado, G., Troyo, E., Aguirre, A., Murillo, B., Beltrán, L. F., & García, J. L. (2010). Calibración y aplicación del índice de aridez de Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zona áridas. *Universidad y Ciencia*, 26(1), 51-64.
- MFEWS. (2008). Perspectiva de Seguridad Alimentaria, julio a diciembre 2008. USAID, Mesoamerican Famne Early Warning System (MFEWS). Recuperado de <https://fews.net/es/global/food-security-outlook/june-2008>.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2002). Cartografía y análisis de la vulnerabilidad a la inseguridad alimentaria en Guatemala. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Editorial del Programa Mundial de Alimentos.
- Miranda, J. D. (2007). Cambio climático y patrones de precipitación: efecto sobre las comunidades vegetales semiáridas (Tesis de Doctorado) Universidad de Granada, Granada, España.
- Montealegre, J. D. (2009). Informe final de las actividades desarrolladas en el marco del contrato de prestación de servicios No IDEAM 022 – 2009. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.
- Mora, B., & Reyes, V. (2013). Análisis de tendencias y variación anual e interanual de las precipitaciones (período: 1957-2006) en la cuenca del río Boconó, estado Trujillo, Venezuela. *Revista de Investigación*, 37(80), 45-68.
- Olivares, B., Caraballo, L., & Torrealba, J. (2013). Variabilidad del régimen de precipitación en el periodo 1990-2009 en la localidad de El Tigre estado Anzoátegui, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 30(1), 1-10.
- Ordóñez, P., Ceacero, C. J., Mesas, A. I., Méndez, J. M., & Barba, R. (2008). Análisis del estado del clima en Andalucía mediante índices climáticos atmosféricos. IX Congreso Nacional del Medio Ambiente. Fundación

CONAMA, Madrid, España. Recuperado de <http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/>

- Oreskes, N., Conway, E., Karoly, D. J., Gergis, J., Neu, U., & Pfister, C. (2018). The denial of global warming. London: Editorial Palgrave handbook of climate history.
- Oviedo, B. E. (2010). Generación de escenarios de cambio climático regionales y locales a partir de modelos globales - guía para tomadores de decisiones. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- Pacheco, J., Alonso, N., Pujol, P., & Camejo, E. (2007). Riego y Drenaje. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación.
- Palacio, D. C. (2021). Retos y aprendizajes para el manejo de eventos extremos por cambio climático. Caso de estudio: el sistema de alerta temprana comunitaria en la cuenca del río Bogotá (Colombia) como medida de adaptación ante la amenaza de inundación. *Revista Espacios*, 42(21), 1-15.
- Paredes, Y. (2022). Evidencia sobre cambio climático y salud en la Facultad de Medicina de la Universidad de Los Andes, Mérida–Venezuela. *Revista Del Grupo de Investigaciones en Comunidad y Salud*, 7(2), 8-10.
- Parry, M., Canziani, O., Palutikof, J., Van der Linden, P., & Hanson, C. (2007). Cambio Climático 2007. Impacto, Adaptación y Vulnerabilidad. Reino Unido: Cambridge University Press.
- Plúa, J. L. (2021). Curvas IDF mediante el método de Pearson para la cuenca hidrográfica MA-01 del Sur de Manabí, caso Sub-cuenca del río Jipijapa (Tesis de Pregrado). Universidad Estatal del Sur de Manabi. Jipijapa, Manabí, Ecuador.

- Ramírez, J. L., Herrera, R. S., Leonard, I., Cisneros, M., Verdecia, D., & Álvarez, Y. (2011). Relación entre factores climáticos, rendimiento y calidad de *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT 169 en el Valle del Cauto, Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 45(3), 293-297.
- Ritter, O., Guzmán, R., Sánchez-Santillán, N., Suárez, S., Corona, V., Muñoz, N., Ramos, V., Rodríguez, M., & Pérez, E. (2002). El clima como sistema complejo adaptativo en coevolución. *Ciencia y Mar*, 17, 23-35.
- Robayo, D. M. (2020). Medidas de posición en variable continua y discreta – datos desagrupados con Microsoft Excel (Generación de contenidos impresos N.º 19). Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Cooperativa de Colombia.
- Rodríguez, M., & Mance, H. (2009). Cambio climático: lo que está en juego, Bogotá, Colombia: Foro Nacional Ambiental.
- Romero, D. (2012). Taller Internacional Clima, sequía y agua subterránea, Ciudad de México. *Investigaciones geográficas*, (78), 155-158.
- Rómulo, E. (2014). El cultivo de secano. *Revista de Geografía Agrícola*, (52-53), 61-113.
- Rondero, C. (2010). Cálculo promedial. El caso de la media aritmética. *Relime*, 13 (4-II), 387-408.
- Ruiz, H. R. (2018). Pronóstico de las exportaciones del cacao ecuatoriano para el 2018 con el uso de modelos de series de tiempo. *INNOVA Research Journal*, 3(6), 9-20.
- Semarnat (2009). Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. Recuperado de http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cambio_climatico.pdf
- Sánchez, F. J. (2005). Precipitaciones. Concepto. Tipos. Medida. Unidades. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.

- Santiago, J. A., López, M., & López, S. (2008). Tendencias del cambio climático global y los eventos extremos asociados. *Ra Ximhai*, 4(3), 625-633.
- Sosa, Y., Peña, M., & Cosme, E. (2017). Sistema para la alerta temprana de los efectos del cambio climático en la agricultura. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 11(3), 64-76.
- Trusov, I. I., Izquierdo, A., & Díaz, L. R. (1983). Características espaciales y temporales de las precipitaciones atmosféricas en Cuba. La Habana, Cuba: Editorial Academia del Instituto de Geografía.
- UNDP. (2010). La adaptación al cambio climático en costa rica: una estimación de las inversiones necesarias. Recuperado de http://www.undpcc.org/content/costa_rica-es.aspx.
- USAID. (2007). Adaptación a la variabilidad y al cambio climático un manual para la planificación del desarrollo. Washington D. C., Estados Unidos de América: Editorial de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional.
- Useros, J. L. (2013). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71-98.
- Vega, P. (2004). La educación ambiental en la formación inicial del profesorado. Análisis de un modelo didáctico para el desarrollo de la competencia para la acción a favor de la media (Tesis de Doctorado). Universidad de La Coruña, La Coruña, España.
- Verdezoto, F. P., Muyulema, J. C., Serrano, A. K., y Verdezoto, L. F. (2021). Evaluación de la variabilidad climática en el cantón Chillanes mediante los parámetros de la precipitación y la temperatura. *Alfa Publicaciones*, 3(4.1), 70-84.

Villón, M. (2002). Hidrología. Serie de Ingeniería Agrícola. Cartago, Costa Rica: Editorial Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Weart, S. (2015), History of Scientific Work on Climate Change, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Oxford, UK: Elsevier

Zabala, I., y García, M. (2008). Historia de la Educación Ambiental desde su discusión y análisis en los congresos internacionales. *Revista de Investigación*, 63, 201-18.

ANEXO I. Aval de introducción de resultados científicos



EMPRESA DE APROVECHAMIENTO HIDRÁULICO
CIEGO DE ÁVILA

AVAL DE INTRODUCCIÓN DE RESULTADOS

Este documento va dirigido al Consejo Científico de la Facultad de Ciencias Técnicas de la Universidad de Ciego de Ávila Máximos Gómez Báez con la que tenemos proyectos de investigación con la participación de profesores de dicha universidad y especialistas de nuestra entidad.

De esta manera CERTIFICO que los resultados que aparecen a continuación son frutos de la colaboración entre ambas instituciones y han contado con todo el apoyo que nos han solicitado. Se pueden mencionar los resultados siguientes:

- Procedimiento para la desestacionalización de la lluvia diaria.
- Construcción del Climograma en diferentes municipios de la provincia Ciego de Ávila.
- Indicadores para estimar evidencias de cambio climático en diferentes municipios de la provincia Ciego de Ávila.
- Determinación de la sequía metodológica por el indicador IPN.
- Determinación de la probabilidad de la lluvia diaria mediante la función Gamma incompleta.
- Cálculo de las rachas lluviosas.
- Calculo del coeficiente de concentración de la lluvia diaria.
- Determinación de las curvas de Intensidad Frecuencia y Duración de la lluvia.
- Sistemas informáticos para la estimación de evidencias de cambio climático y el análisis de las precipitaciones diarias.

Atentamente,



Gisela Rodríguez Santana
Directora General de EAH

