

**VARIACIÓN EN EL POTENCIAL DE RIEGO DEL SISTEMA LAS MAJAGUAS
BAJO CONDICIONES DE CAMBIO CLIMATICO**

por:

Francisco Javier Vásquez Freyle

CI: 16.459.663

Trabajo para optar por el grado de Magíster Scientiae en Desarrollo de los Recursos Aguas y Tierras, Mención: Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN
AMBIENTAL Y TERRITORIAL (CIDIAT)
MÉRIDA, VENEZUELA
JUNIO 2019**

c.c Reconocimiento

**VARIACIÓN EN EL POTENCIAL DE RIEGO DEL SISTEMA LAS MAJAGUAS
BAJO CONDICIONES DE CAMBIO CLIMATICO**

por:

Francisco Javier Vásquez Freyle

CI: 16.459.663

Trabajo para optar por el grado de Magíster Scientiae en Desarrollo de los Recursos Aguas y
Tierras, Mención: Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos

www.bdigital.ula.ve

Prof. Ángela Henao

C.I. V-3.373.794

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN
AMBIENTAL Y TERRITORIAL (CIDIAT)
MÉRIDA, VENEZUELA
JUNIO 2019**

c.c Reconocimiento

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios, ya que sin él nada es posible.

A mis hijos, que son la fuerza que impulsa mi vida.

A mis padres, por siempre contar con ellos en los logros y en las caídas.

A mi esposa, por su apoyo incondicional.

A mi suegra, por su consideración y sacrificio.

Al Profesor Roberto Duque por sus enseñanzas y hospitalidad.

A mi amigo Benedicto Rincón por contar con el siempre que lo necesité.

A los profesores Hervé Jégat y Alberto Bandes, por sus valiosos consejos.

A mi tutora la Profesora Ángela Henaó O., por su paciencia y dedicación.

A mis vecinas Berta y Eneida, por sus atenciones.

A mis compañeros de estudio, por su amistad.

A todo el personal administrativo del CIDIAT, por su amable atención durante toda la maestría.

A todas aquellas personas que de una u otra manera, contribuyeron con el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABLAS.....	xvi
LISTA DE ECUACIONES.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. Justificación.....	4
1.4. Alcance.....	5
1.5. Limitaciones.....	6
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	7
2.1. Gestión del sistema de riego Las Majaguas	7
2.1.1. Bases legales	8
2.1.2. Bases técnicas del sistema Las Majaguas.....	9
2.2. Simulación hidrológica de una cuenca.....	10
2.2.1. Modelos hidrológicos paramétricos	10
2.2.1.1. HEC-HMS.....	10
2.2.1.2. SWAT (Soil and Water Assesment Tool).....	10
2.2.1.3. MIKE SHE	10
2.2.1.4. HBV.....	10
2.2.1.5. TOPMODEL	11
2.2.2. Modelo de simulación hidrológica a nivel mensual (SIHIM).....	11
2.2.2.1. Formulación Matemática de los Procesos.....	12
2.3. La hidrología del cambio climático.....	15
2.3.1. Historia.....	16
2.3.2. El cambio climático y los recursos hídricos.....	22
2.3.3. Modelos climáticos y recursos hidráulicos	24
2.3.3.1. Magicc/Scengen	25
2.3.3.2. Climate Explorer	26
2.3.3.3. WorldClim.....	28
2.3.3.4. Resumen.....	29
2.4. Estimación de demandas en un sistema de riego	29
2.5. Definición de términos básicos	31
CAPÍTULO 3 ESTUDIO DE CASO	33
3.1. Descripción del área de estudio.....	33
3.1.1. Sistemas hidrológicos.....	34
3.1.1.1. Sistema hidrológico Yaracuy	34
3.1.1.2. Sistema hidrológico Lara	36
3.1.2. Información cartográfica	37
3.1.3. Información hidroclimática	37

5.2.1. En general.....	67
5.2.2. Mantenimiento	67
5.3. Obras de toma y distribución	67
5.3.1. Sector M7	68
5.3.1.1. Infraestructura	68
5.3.1.2. Mantenimiento	68
5.3.2. Sector M5	68
5.3.2.1. Mantenimiento	68
5.3.3. Otras	69
CAPÍTULO 6 HIDROLOGÍA DE LOS RÍOS COJEDES Y SARARE.....	71
6.1. Procesamiento de los datos cartográficos.....	71
6.2. Delimitación de cuencas y Subcuencas.....	71
6.3. Procesamiento de los datos hidroclimáticos.....	71
6.3.1. Análisis de los datos de precipitación.....	71
6.3.1.1. Depuración de los datos climáticos	72
6.3.1.2. Selección de las estaciones de precipitación	74
6.3.1.3. Determinación de datos faltantes y englobados	77
6.3.1.4. Isolneas de precipitación	78
6.3.1.5. Calculo de la precipitación media	78
6.3.2. Análisis de los datos de evaporación.....	79
6.3.2.1. Selección de los datos de evaporación	79
6.3.2.2. Calculo de la evaporación media.....	80
6.3.3. Análisis de los datos de caudal.....	80
6.4. Simulación hidrológica a nivel mensual	81
6.4.1. Calibración	81
6.4.1.1. Cojedes.....	81
6.4.1.2. Sarare.....	83
6.4.2. Modelación.....	85
6.4.2.1. Cojedes.....	85
6.4.2.2. Sarare.....	86
CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ZONA	89
7.1. Selección de los modelos climáticos	89
7.2. Modelación.....	93
7.2.1. Validación del Climate Explorer	93
7.2.2. Reducción de escala	95
7.2.2.1. Datos historicos.....	95
7.2.2.2. Datos Futuros.	96
7.2.3. Estimación de caudales	97
7.2.3.1. Caudales hasta el año 2020	97
7.2.3.2. Caudales periodo 2021-2050.....	99
7.2.4. Análisis Estadístico	103
7.2.5. Análisis de los caudales.....	105
CAPÍTULO 8 ANÁLISIS DE DEMANDAS DE RIEGO	109
8.1. Comparación histórico versus futuro	109
8.1.1. Demandas de riego periodo 2006–2016.....	110
8.1.2. Demandas de riego periodo 2021-2050.....	111

LISTA DE FIGURAS

2.1. Conceptualización del modelo hidrológico regional.....	12
2.2. Anomalía del promedio global de temperaturas en superficie terrestre y oceánicas combinadas... 16	
2.3. Promedio global de concentraciones de gases de efecto invernadero.....	16
2.4. Incremento del nivel del mar desde 1993 al 2018.....	23
2.5. Estructura del modelo MAGICC/SCENGEN.....	26
2.6. Página de entrada para la búsqueda de información del CMIP5 en el Climate Explorer.....	27
3.1. Ubicación del sistema de riego Las Majaguas..	34
3.2. Segunda selección de las estaciones hidroclimáticas a utilizar.....	40
3.3. Polígonos de Thiessen aplicados a las estaciones climáticas.....	40
3.4. Ubicación de estaciones hidrométricas cuenca Cojedes y Sarare.....	41
3.5. Promedio total del área regada en hectáreas en la temporada 1999 – 2016 del sistema de riego Las Majaguas.....	42
3.6. Vista en planta de la toma del río Cojedes.....	44
3.7. Vista en planta de la toma del río Sarare.....	44
3.8. Conjunto de obras del embalse: presa, aliviadero, derivaciones, tomas y canales principales.....	45
3.9. Variación de la capacidad del embalse Las Majaguas (1963-original, CIDIAT-1993 y 2009-nueva batimetría).....	46
3.10. Sectores cubiertos por los canales M5 y M7.....	47
3.11. Principales aldeas agrícolas existentes en la zona.....	49
3.12. Rubros sembrados en el sistema de riego Las Majaguas en la Temporada 1991 – 2016.....	49
3.13. Volumen extraído vs volumen entregado al sistema de riego Las Majaguas temporada 1999–2016.....	50
3.14. Eficiencia en la entrega de agua del sistema de riego Las Majaguas temporada 1999–2016.....	51
4.1. Flujograma diagnóstico del sistema de riego Las Majaguas.....	53
4.2. Flujograma hidrología de los ríos Cojedes y Sarare.....	55
4.3. Flujograma análisis del cambio climático en la zona.....	56
4.4. Flujograma análisis de demandas de riego.....	58
5.1. Obra de Toma sobre el río Cojedes.....	60
5.2. Desarenador sobre la toma del río Cojedes.....	60
5.3. Compuertas de regulación de niveles y alivio en el río Cojedes.....	61
5.4. Canal de derivación del río Cojedes en la toma.....	61
5.5. Presa de derivación del río Sarare. A la izquierda antes de la limpieza y a la derecha actual.....	62
5.6. Entrada a la toma. A la izquierda antes de la limpieza y a la derecha actual.....	63
5.7. Equipos de control de las compuertas canal de derivación Sarare.....	63
5.8. Desarenador Toma río Sarare.....	64
5.9. Tubería de rebose del drenaje de Cerro el Loro hacia el canal de derivación Sarare.....	65
5.10. Canal natural paralelo al canal de derivación Sarare. Izquierda vista aguas abajo, derecha vista aguas arriba.....	65

7.13. Caudales simulados cuenca del río Sarare en el periodo 2021 - 2050, modelo HadGEM2-ES, escenario RCP45.	101
7.14. Caudales simulados cuenca del río Sarare en el periodo 2021 - 2050, modelo GISS-E2-Rp1, escenario RCP45.	101
7.15. Caudales simulados cuenca del río Cojedes en el periodo 2021 - 2050, modelos MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES y GISS-E2-Rp1, escenario RCP45.	102
7.16. Caudales simulados cuenca del río Sarare en el periodo 2021 - 2050, modelos MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES y GISS-E2-Rp1, escenario RCP45.	102
7.17. Promedio caudales simulados cuenca del río Cojedes en el periodo 2021 - 2050, escenario RCP45.	103
7.18. Promedio caudales simulados cuenca del río Sarare en el periodo 2021-2050, escenario RCP45.	103
7.19. Curvas de duración de caudales de los ríos Cojedes y Sarare en el periodo 1968–1982.	105
7.20. Curvas de duración de caudales de los ríos Cojedes y Sarare en el periodo 2008–2020.	106
7.21. Curvas de duración de caudales de los ríos Cojedes y Sarare en el periodo 2021–2050.	107
8.1. Déficit de precipitación por cultivo periodo 2006 - 2016.	110
8.2. Requerimiento de riego del sistema periodo 2006 - 2016.	110
8.3. Déficit de precipitación por cultivo periodo 2021 - 2050.	111
8.4. Requerimiento de riego del sistema periodo 2021 - 2050.	112
8.5. Déficit de precipitación por cultivo patrón de siembra bajo la tendencia actual.	113
8.6. Requerimiento de riego del sistema patrón de siembra bajo la tendencia actual.	113
8.7. Déficit de precipitación por cultivo patrón de siembra bajo la tendencia actual.	114
8.8. Requerimiento de riego del sistema patrón de siembra bajo la tendencia actual.	115
9.1. Volumen de agua entregado por temporadas de riego en el periodo 1999-2014 en el sistema de riego Las Majaguas.	119

LISTA DE ECUACIONES

2.1. Precipitación media ajustada.....	13
2.2. Evaporación media ajustada.....	13
2.3. Evapotranspiración potencial.....	13
2.4. Evapotranspiración real.....	13
2.5. Contenido limite de humedad.....	13
2.6. Infiltración potencial.....	13
2.7. Infiltración real.....	13
2.8. Percolación durante el mes.....	14
2.9 Relación de humedad del suelo.....	14
2.10. Factor para ajustar FPER y REL.....	14
2.11. Fcator de la infiltración real que percola en el mes.....	14
2.12. Almacenamiento superficial en el mes.....	14
2.13. Almacenamiento superficial final.....	14
2.14. Humedad final del suelo.....	14
2.15. Humedad del suelo en el mes.....	14
2.16. Almacenamiento final del agua subterránea.....	14
2.17. Almacenamiento promedio del agua subterránea.....	14
2.18. Esgurrimento durante el mes.....	15
2.19. Esgurrimento retardado.....	15
2.20. Caudal base.....	15
2.21. Flujo subterráneo efluente.....	15
2.22. Ecuación de verificación.....	15
2.23. Esgorrentía total en el mes.....	15
2.24. Esgorrentía en el mes.....	15
2.25. Esgorrentía retardada.....	15
6.1. Fórmula de Langbein.....	77

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el ambiente, este representa uno de los principios establecidos por la Asociación Mundial del Agua, para la Gestión Integral de los recursos Hídricos. Conocer este principio es fundamental para el desarrollo de una comunidad, ciudad o país, ya que nos concientiza acerca del uso eficiente que le debemos dar al agua, desde la captación, conducción y tratamiento, hasta el usuario final de este vital recurso.

Venezuela en particular, es un país que cuenta con una enorme cantidad de recursos hídricos, sin embargo en su mayoría no son aprovechados eficientemente, encontrándonos con problemas que van desde la escasez de datos hidrometeorológicos necesarios para análisis hidrológicos, como el no considerar los efectos del cambio climático en los diseños, la falta de mantenimiento de las obras existentes, hasta un uso ineficiente del agua por parte de los usuarios finales ocasionando grandes pérdidas del preciado recurso.

En el año 1936, el gobierno nacional crea el Ministerio de Agricultura y Cría y la Dirección de Riego en el MOP, construyendo con fondos públicos sistemas de riego en tierras de la nación y en tierras privadas, los cuales permitirían el desarrollo de zonas agrarias, garantizando el bienestar alimentario del país. Sin embargo, al transcurrir del tiempo, estos sistemas de riego concebidos con metas de producción escalonadas, se estancaron, y empezaron a decaer por diversas razones, dentro de las que destacan: la falta de culminación de algunas de las obras diseñadas, la siembra de rubros no contemplados inicialmente en el sistema de riego y el poco o ningún mantenimiento de las instalaciones.

Lo anteriormente expuesto, ha conllevado al trabajo ineficiente de nuestros principales sistemas de riego, utilizando más agua de la necesaria para generar una misma producción, provocando el abandono de muchas de las áreas inicialmente previstas para producción.

Uno de los sistemas de riego en esta situación, es el Sistema de Riego Las Majaguas, ubicado en los municipios Páez, Agua Blanca y San Rafael de Onoto del estado Portuguesa. Fue publicado en Gaceta Oficial el 17 de enero de 1959 bajo el decreto No 539, sin embargo en septiembre de 1958, ya se habían iniciado los trabajos de construcción del embalse.

El sistema de riego Las Majaguas, fue conceptualizado dentro de un plan para regar 90.000 ha, mediante la construcción de dos embalses: Las Majaguas y la represa Las Palmas aun sin construir, sin embargo solo fue construido el embalse Las Majaguas, el cual tenía una meta de riego de 19.000 ha según el plan de Las Majaguas desarrollado por el MOP en el año 1965, de las cuales solo se están regando actualmente un total de 12100 ha. El embalse Las Majaguas es uno de los pocos en Venezuela cuya construcción se realizó fuera del lecho del río. Sus afluentes son los ríos Cojedes que aporta un 78% del caudal ($70 \text{ m}^3/\text{s}$), y el río Sarare que aporta el 22% restante ($20 \text{ m}^3/\text{s}$). La capacidad original del embalse a nivel normal es de 301,63 millones de m^3 para un área de 4.250 ha.

Sin embargo en la actualidad, realizar el análisis de cualquier sistema hidrológico, así como la planificación de recursos hidráulicos, sin tomar en cuenta los cambios en las variables climáticas a través del tiempo, constituye una imprudencia. Es por ello que desde finales del siglo XIX, muchos científicos en todo el mundo se han dedicado a realizar mediciones de las variables climáticas en miles

Es por tal motivo, que si se cuestiona la disponibilidad de agua en el Sistema de Riego Las Majaguas, no tiene sentido realizar la hidrología, estimar las demandas y en general hacer el análisis oferta-demanda, sin incluir el cambio climático como un escenario, de hecho un escenario con una muy alta probabilidad de ocurrencia, en la que solo debemos cuestionar, la magnitud del impacto de dicho cambio sobre el sistema.

1.1. Planteamiento del problema

La planificación constituye uno de los principales instrumentos con el que el ser humano cuenta para enfrentar, evitar y/o solucionar problemas, incluso antes de que ocurran. Aunado a ello nos encontramos con un recurso indispensable para la vida como lo es el agua, el cual en conjunto con la visión de su uso, conforman la planificación de recursos hídricos. Pero para comenzar a planificar y garantizar el correcto aprovechamiento del agua, se requieren datos históricos, con los cuales es posible estimar la disponibilidad de agua en un área determinada.

Como se mencionó en el punto anterior, el área a estudiar es la del sistema de riego Las Majaguas, conformado por un embalse con el mismo nombre, el cual según estudios técnicos realizados por el MOP en 1993 mostraba una reducción de su capacidad en un 10%, producto de sedimentación por el mal uso de las compuertas y desarenadores de las tomas de los ríos. Sin embargo gracias a su ubicación fuera del lecho de sus aportantes el embalse muestra muy poca sedimentación, aspecto verificado al comparar las batimetrías realizadas en el año 1993 por el CIDIAT y 2009 por el Ministerio del Ambiente.

En el año 2015, el Instituto Nacional de Desarrollo Rural, realiza una actualización del plan nacional de riego, en el que aparece el sistema de riego Las Majaguas con un área bajo riego de 18000 ha; 1000 ha menos que lo establecido en el plan original de la Majaguas desarrollado por el Ministerio de Obras Publicas en el año 1965, de las cuales solo se estarían regando 12100 ha. Más de un 32% del área original no se está regando, y aun así los agricultores de la zona, se quejan por no tener una cantidad de agua suficiente para sus cultivos. Esta situación genera una disyuntiva, ya que si el sistema fue creado para regar 19000 ha y solo se están regando 12100 ha, el sistema debería tener agua en exceso y no un déficit de la misma. Muchas de las razones de este déficit de agua, apuntan al deterioro de las instalaciones, a la siembra de rubros no establecidos inicialmente en el sistema de riego, sedimentación del embalse, mal uso del sistema de riego y por supuesto, a posibles efectos del cambio climático.

El Ingeniero Iván Baldayo residente de la zona y actual integrante del consejo de cañicultores de las Majaguas, realizo un diagnóstico del sistema de riego Las Majaguas en el año 2001, en el cual pudo identificar el grave estado de las infraestructuras del mismo, destacando en primer lugar la falta de los mecanismos que hacen posible abrir y cerrar las compuertas de la represa, así como los mecanismos correspondientes a cada uno de los canales de derivación, motivado al hurto de los mismos. Esta situación hace ineficiente la operación del sistema, al enviar más agua a algunos sectores y dejar secos a otros.

En resumen, los estudios realizados recientemente concluyen, que el estado físico del sistema es uno de los factores principales de la deficiencia de agua.

Pero no es posible analizar un problema tan complejo, considerando uno solo de los factores. La realidad es que en primer lugar, no se cuenta con una hidrología confiable, más aun cuando se debe destacar, que nunca se realizó un análisis hidrológico del sistema, por lo tanto habría que preguntarse cómo se estimó inicialmente la disponibilidad de agua.

Se presenta entonces una situación irregular dentro del sistema, que puede estar originada en problemas de oferta, demanda, consumo, distribución o de muchos otros factores que no necesariamente son independientes entre sí y que generan dudas sobre el aprovechamiento del sistema de riego.

Es importante mencionar por increíble que parezca, en ninguno de los estudios revisados se obtuvo evidencia de la elaboración de un estudio hidrológico de los ríos Cojedes y Sarare, principales aportantes del sistema de riego. Aunque es “evidente” que con los caudales registrados de ambos ríos en los meses lluviosos, no debería presentarse problemas en cuanto al llenado del embalse. Sin embargo no es recomendable operar un embalse con tan poca información técnica, por lo que se hace más evidente la necesidad de realizar el presente estudio.

Si a esta situación actual se le añade el impacto que podría presentarse como consecuencia del cambio climático, que ya está generando conflictos en otros usos como la generación hidroeléctrica y el abastecimiento de agua a poblaciones, se considera necesario preparar nuestros sistemas de riego ante este tipo de eventos.

Los problemas que se han mencionado no son independientes entre sí, de hecho en conjunto conllevan a una posible reducción de la capacidad de riego de los sistemas.

Por todo lo anteriormente expuesto se propone analizar el funcionamiento del sistema de riego, sus potencialidades y sus debilidades para que dado un horizonte de planificación específico se pueda planificar el uso potencial del sistema de riego Las Majaguas.

1.4. Alcance

Se realiza un diagnóstico de las condiciones actuales del sistema de riego Las Majaguas, tanto físicas como de operación del sistema.

Se presenta un análisis de la influencia que puede darse como consecuencia del cambio climático en la hidrología de las cuencas aportantes al sistema de riego Las Majaguas, bajo las condiciones actuales y futuras apoyándose en los modelos climáticos recomendados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Se utilizan los resultados obtenidos del Quinto informe de Evaluación publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en el año 2013-2014.

Los datos obtenidos de los modelos climáticos, provienen de simulaciones realizadas por varios institutos avalados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, el cual es un organismo intergubernamental de las Naciones Unidas, dedicado a proporcionar al mundo una visión científica y objetiva del cambio climático, sus impactos y riesgos naturales, políticos y económicos. Sin embargo el análisis a detalle de cómo fueron obtenidos dichos datos no fue realizado.

Los resultados se presentan a nivel mensual, para el periodo comprendido entre el año 2021 y el año 2050, para un escenario intermedio.

Se realiza una estimación de la demanda de riego bajo los efectos del cambio climático, utilizando el software CROPWAT 8.0 para los principales rubros que se siembran en el sistema.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Los aspectos en los cuales se basa esta investigación se cimienta en tres puntos fundamentales, la gestión del sistema de riego Las Majaguas, el análisis hidrológico de las dos cuencas aportantes al sistema de riego considerando la influencia del cambio climático y la estimación del grado de afectación de la demanda de riego en nuestra área de estudio también por efecto del cambio climático.

Partiendo de una visión histórica se describen cada uno de los procesos desarrollados desde el punto de vista de los autores. Iniciando con la descripción del origen de los sistemas de riego en el país y específicamente del sistema de riego Las Majaguas, seguido de una revisión de los modelos utilizados para realizar estudios hidrológicos a nivel mundial y en particular el seleccionado para el presente trabajo. Luego se detallan los cambios en la metodología para el análisis del cambio climático desde la creación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en 1988, hasta la utilización de escenarios definidos por trayectorias de concentración representativas usadas en la actualidad. Finalizando con la revisión histórica de los cultivos sembrados dentro del sistema, las áreas regadas y la variación de las demandas de agua del sistema.

2.1. Gestión del sistema de riego Las Majaguas

El momento en la historia en el que las políticas de Venezuela enfatizaron garantizar la seguridad agroalimentaria del país, fue en la década de los cuarenta, en la que se construyeron los sistemas de riego Suata-Taiguaguay, Tuy, San Carlos, Cumaná y el Cenizo. En los años cincuenta se construye el sistema Río Guárico y posteriormente en los años sesenta se construyen los sistemas Río Boconó, Río Guanare, Santo Domingo y las Majaguas, siendo este último considerado como uno de los más importantes del país debido a su plan de desarrollo y al hecho de estar dedicado a beneficios campesinos en función de la reforma agraria. Así lo establecen Altuve, R., Casas M., Chacón R. (1991) en su trabajo “Diagnostico General de la Situación Actual de los Sistemas de Riego en Venezuela”.

En ese mismo trabajo, se definieron índices para comparar los sistemas de riego, siendo el sistema de riego Las Majaguas, el que obtuvo el mayor puntaje en el índice de uso del sistema en la región, no ocurriendo lo mismo con respecto a los beneficios, como se pudo observar en los índices económicos, tanto el índice de rendimiento de ingreso bruto por ha, como el índice de ingreso bruto por volumen de agua captado, debido al poco control en cuanto a los contratos de riego y a las tomas de parcelas.

Al finalizar el estudio se concluyó, que de las 204979 hectáreas proyectadas de los sistemas de riego estudiados en el país, solo se estaban regando 66200 hectáreas, lo que representa un 32.30%. Este bajo porcentaje se debe a numerosas fallas, en las que destacan: falta de créditos a los productores de manera oportuna, bajos presupuestos asignados a los sistemas de riego para labores de mantenimiento, falta de comercialización y mercado seguro en algunos sistemas, mal manejo del recurso agua debido a la forma desmedida de captarla y aplicarla, estableciendo como un caso en particular el sistema de riego Las Majaguas donde se aplica hasta 7.85 veces la cantidad de agua requerida por el cultivo, no cuenta con personal especializado que maneje más eficazmente el sistema y los créditos otorgados por el Instituto de Crédito Agrícola y Pecuario definen el cultivo sin tomar en cuenta las características del suelo.

Hay que añadir que existe una concepción errada de parte de la “Empresa Socialista de Riego Las Majaguas”, de depender exclusivamente del gobierno nacional para mantener sus operaciones, ya que

2.1.2. Bases técnicas del sistema Las Majaguas

Baldayo, I. y Bolívar (2001) presentan una excelente revisión de la historia de este sistema. Resumiendo esta revisión se tiene que entre los años 1947 y 1949 se publicaron las “Consideraciones básicas para la elaboración de un plan nacional de irrigación a ser desarrollado durante el periodo 1950-1970” como parte de la promulgación del PLAN NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Para ese momento en Venezuela se comenzaban a realizar los primeros estudios hidrológicos, así como los estudios edafológicos preliminares del área entre los ríos Cojedes y Acarigua.

Hasta 1958, la situación política del país dominó sobre cualquier esfuerzo de planificar los recursos hídricos y a pesar de ello en 1957, se dio inicio a la construcción de las obras civiles, culminando en 1962-1963 la construcción propiamente de la presa, obras conexas y alrededor del 80 % del sistema de riego. Para ese momento se habían construido los canales primarios y secundarios revestidos de concreto para el riego de unas 17.840 ha, aproximadamente 73% de la superficie total planificada.

El 20 de mayo de 1963 se comenzó a llenar el embalse Las Majaguas por derivación del río Sarare y lluvias caídas en ese período. El 22 de diciembre de 1964, el río Cojedes comenzó a alimentar el embalse.

Los registros estadísticos del embalse se empezaron a llevar por el Departamento de Operación del Ministerio de Obras Públicas a partir del 10 de marzo de 1964. En el canal alimentador del río Cojedes, progresiva 1 + 382 y el alimentador Sarare progresiva 2 + 700 se encuentran ubicadas las estaciones fluviográficas para control del volumen aportado, dichas estaciones están dotadas de un limnógrafo Stevens A-35.

El 23 de junio de 1963, es inaugurada solemnemente la casi terminada represa o embalse “las Majaguas”, con presencia del presidente de la república Rómulo Betancourt (1959-1964) quien inicio el proyecto en 1947, acompañado del Ministro de Obras Públicas, el Gobernador del Estado Portuguesa y el alcalde de San Rafael de Onoto, entre otras personalidades presentes en el acto.

En 1964 comienza a aplicarse el riego en el sistema, en 1975 estaban listas para ser aprovechadas unas 12840 ha, además de 6.650 ha desarrolladas en forma espontánea por los agricultores de la zona, algunas incluso sin contar con los canales del sistema de riego sino utilizando derivaciones de fuentes cercanas como las quebradas Masato, Honda, Las Majaguas y el mismo río Sarare.

Baldayo, I. y Bolívar (2001) en su informe concluye que *“Esta fue la última incorporación de áreas al desarrollo y producción intensiva en el sistema de riego Las Majaguas”*.

Según un informe del Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Recursos Hidráulicos (s.f), en una primera etapa el embalse las Majaguas regaría un total de 23000 ha netas. Con la finalización de la presa las Palmas; situada aguas arriba sobre el río Cojedes, se concluía la segunda etapa y se pretendían regar 43000 ha netas con la operación conjunta. Esto se lograría anexando el sistema Pimpinela y Cruz-El Amparo, con 10000 ha cada uno.

Sin embargo la segunda etapa, aunque se comenzó nunca se concluyó, ni siquiera llego a concluirse la primera etapa, por lo que hasta la fecha solo es posible teóricamente aprovechar como máximo las 12840 ha previstas en el año 1975.

su vez, en diferentes zonas de elevación y vegetación. Trabaja con datos diarios y mensuales de precipitación, temperatura del aire y evaporación.

2.2.1.5. TOPMODEL

Es un modelo conceptual de área de contribución variable. Desarrollado por Beven and Kirkby (1979), es un modelo que se puede usar en subcuencas únicas o múltiples usando datos de elevación en cuadrículas para el área de captación. Ayuda en la predicción del comportamiento hidrológico de las cuencas. Los principales factores considerados en el modelo son la topografía de la cuenca y la transmisividad del suelo.

De todos los modelos analizados, la mayoría requieren de información no disponible en Venezuela para poder trabajar. Otros modelos son privativos, requieren de una licencia para su uso. Luego del análisis y comparación, se decidió escoger para esta investigación el modelo SIHIM desarrollado por Duque, R. y Barrios, A. (1991).

Los motivos por los cuales se decidió utilizar el modelo SIHIM son porque es un modelo de uso libre, es de fácil adaptación ya que solo considera seis parámetros que permiten obtener una buena calibración sin la necesidad de parámetros excesivos, es un modelo mensual ampliamente utilizado en el CIDIAT para proyectos hidrológicos, su uso forma parte del programa de la Maestría de Planificación, por lo que representa un buen ejemplo para poner en práctica lo aprendido durante la escolaridad y por último, el profesor Roberto Duque uno de los desarrolladores del programa, mantiene comunicación con el equipo del CIDIAT, por lo que fue mucho más sencillo resolver cualquier inconveniente o duda en el uso del programa.

www.bdigital.ula.ve

2.2.2. Modelo de simulación hidrológica a nivel mensual (SIHIM)

En el presente estudio se utilizará un modelo paramétrico lluvia-escorrentía denominado Modelo de Simulación Hidrológica Mensual (SIHIM) desarrollado en el antiguo Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, ahora Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) por Duque, R. y Barrios, A. (1991). Este modelo fue seleccionado por la experiencia de su uso en trabajos similares, su versatilidad y que ha demostrado su fácil adaptación a las condiciones hidrológicas de Venezuela. Este modelo tiene la ventaja de contar con solo seis parámetros, lo cual representa un punto importante debido a la escasez de información hidroclimática. Cuenta con la posibilidad de poder calibrarse automáticamente, facilitando la estimación de los parámetros del modelo.

El modelo de simulación mensual SIHIM, permite generar información de caudales a partir de datos de precipitación, evaporación, tipo y uso del suelo.

El modelo simula el sistema hidrológico regional. Los límites de este sistema regional pueden ser fisiográficos, como es el caso de una cuenca hidrográfica, políticos en el caso de un estado o entidad federal, o de cualquier otra índole como pueden ser los límites de un área cultivada.

Este modelo se ha desarrollado para intervalos mensuales. Se considera la cuenca dividida en subcuencas, en las cuales se supone homogeneidad tanto en los procesos hidrológicos como en las condiciones que los afectan.

- **Precipitación**

En el modelo se determina la precipitación media a través del método de los polígonos de Thiessen, pero como se sabe que este método, en ciertas áreas, no es el más apropiado para la estimación de la precipitación media se usa un factor de ajuste el cual se calcula como la relación entre la precipitación media obtenida por el método Isoyético y por el método de Thiessen, tal como se observa en la Ecuación 2.1.

$$PRE = \left\{ \sum_{j=1}^{NEPRE} (PP_j \times PORCP_j) \right\} \times (PMI/PMT) \text{ Ecuación 0.1}$$

- **Evapotranspiración**

El valor de la evapotranspiración potencial se considera como la evaporación medida en tina multiplicada por un coeficiente, tal como se observa en la Ecuación 2.3, y además se asume en el modelo que la demanda evapotranspirativa sólo puede ser suplida por el almacenamiento de humedad del suelo.

Al igual que para la precipitación, es necesario calcular la evaporación media ajustada, tal como se presenta a continuación en la Ecuación 2.2:

$$EVM = \left\{ \sum_{j=1}^{NEVAP} (EV_j \times PORCE_j) \right\} \times (EMI/EMT) \text{ Ecuación 0.2}$$

$$ETP = EVM \times CT \text{ Ecuación 0.3}$$

Para el cálculo de la evapotranspiración real, se toma en consideración la humedad del suelo y el contenido límite de humedad, entendiéndose por este último el contenido de humedad del suelo bajo el cual la evapotranspiración real es inferior a la potencial, tal como se detalla en la Ecuación 2.4 y la Ecuación 2.5.

$$ETR = \begin{cases} ETP & \text{si } HSM > CLE \\ ETP \times \left(\frac{HSM}{CLE} \right) & \text{si } HSM \leq CLE \end{cases} \text{ Ecuación 0.4}$$

$$CLE = 0,25 \times HSN \text{ Ecuación 0.5}$$

- **Infiltración**

La formulación de este proceso es una modificación de la presentada en el modelo Stanford IV. (Crawford y Linsley, 1966) y se basa en el cálculo de la infiltración potencial para toda el área considerada, cuya formulación se observa en la Ecuación 2.6.

$$AINFP = CINF \times (HSN/HSM)^2 \text{ Ecuación 0.6}$$

Dependiendo del valor del suministro de humedad, *HDI*, la infiltración real se determina según se muestra en la Ecuación 2.7.

$$AINFRE = \begin{cases} 0,5 \times AINF & \text{si } HDI > AINFP \\ HDI - \left[\frac{HDI^2}{2,0 \times AINFP} \right] & \text{si } HDI \leq AINFP \end{cases} \text{ Ecuación 0.7}$$

- **Percolación**

La formulación usada para la simulación de este proceso se basa en la relación que existe entre el contenido de humedad y la capacidad nominal del suelo (*REL*), cuyas estimaciones se pueden observar en las Ecuaciones 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11.

$$ESCD = PESC \times ASUP \text{ Ecuación 0.18}$$

$$ESCURT^{(i)} = (1,0 - PESC) \times ASUP \text{ Ecuación 0.19}$$

- **Caudal Base y Flujo Subterráneo Efluente**

Se calculan como una fracción del almacenamiento promedio del agua subterránea, tal como se observa en la Ecuaciones 2.20, 2.21 y 2.22.

$$QB = PQB \times VM \text{ Ecuación 0.20}$$

$$FSUBE = PFSE \times VM \text{ Ecuación 0.21}$$

Se debe cumplir que:

$$PQB + PFSE \leq 1,0 \text{ Ecuación 0.22}$$

- **Escorrentía**

La escorrentía total a la salida del área considerada está constituida por el escurrimiento, una fracción de la escorrentía afluente proveniente de otras áreas y de la escorrentía retardada producida en el intervalo de tiempo anterior así como del caudal base tal como se muestra en la Ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25.

$$ESCT = ESCD + ESCORR + QB \text{ Ecuación 0.23}$$

$$ESCORR = PESC \times (ESCOTA + ESCORT^{(i-1)}) \text{ Ecuación 0.24}$$

$$ESCORR^{(i)} = (1,0 - PESC) \times (ESCOTA + ESCORT^{(i-1)}) \text{ Ecuación 0.25}$$

2.3. La hidrología del cambio climático

El cambio climático según lo define las Naciones Unidas (1998) en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), es el cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

Sin embargo el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2007) en su cuarta comunicación, define el cambio climático como la variación del estado del clima, identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo.

Al analizar las definiciones anteriores, se puede identificar claramente que la CMNUCC atribuye el cambio climático directamente a la actividad humana, mientras que el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático realiza una descripción más generalizada. Según las observaciones más recientes en lo que constituye principalmente al aumento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y al aumento de la temperatura media mundial, es casi inobjetable no atribuir estos cambios a la

técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta.

En 1990 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático publica su primer informe de evaluación, para el cual se analizaron cuatro posibles escenarios, desde la adopción de escasas o ninguna medida para frenar las emisiones, esto es, el Escenario A, o "de seguir todo como hasta ahora," hasta otros supuestos basados en niveles de control crecientes, denominados Escenarios B, C y D, respectivamente. El análisis de estos cuatro escenarios, arrojó resultados alarmantes, destacándose la duplicación efectiva del CO₂ en la atmósfera entre el momento actual y los años 2025-2050, el aumento consiguiente de la temperatura media mundial de entre 1,5°C a 4,5°C, la distribución desigual del aumento de la temperatura mundial, que sería menor en las regiones tropicales, y mayor en las regiones polares, la elevación del nivel del mar de aproximadamente 0,3 a 0,5 m para el año 2050 y de aproximadamente 1 m para el año 2100, así como la elevación de la temperatura de la capa superficial del océano de entre 0,2° y 2,5°C.

Las Naciones Unidas (1992), adoptan en New York la CMNUCC, entrando en vigor en 1994 y cuyo objetivo era lograr la estabilización de la concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impidiese interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático y en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adaptasen naturalmente al cambio climático, asegurando que la producción de alimentos no se viese amenazada el desarrollo económico prosiguiese de manera sostenible.

Las Naciones Unidas (1995), dan inicio en Berlín a las Conferencias de Partes (COP), la cual se realizaría cada año representando la máxima autoridad con capacidad de decisión en temas concernientes al cambio climático, en el que tienen voto todos los países que forman parte de la convención.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático publica el Segundo Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático (1995), para el cual se elaboraron toda una serie de escenarios sobre futuras emisiones de gases de efecto invernadero y precursores de aerosoles con base en hipótesis relacionadas con el crecimiento de la población y económico, el uso de la tierra, los cambios tecnológicos, la disponibilidad de energía y la mezcla de combustible en el período 1990 a 2100.

Los resultados obtenidos fueron mucho más alentadores que los obtenidos en 1990, encontrándose que para el escenario intermedio de emisiones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IS92a, los modelos preveían un aumento de la temperatura media de la superficie mundial, con relación a 1990, de 2°C para el año 2100. Esta estimación es casi un tercio inferior a la "estimación óptima" de 1990. En resumen en el mencionado informe se estimaba un incremento de la temperatura media mundial entre 1,0 a 3,5°C.

En 1997 en la tercera conferencia sobre cambio climático desarrollada en Japón, se aprobó por las Naciones Unidas (1998) el Protocolo de Kyoto, el cual tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan calentamiento global, como lo son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆). En el protocolo se acordó una reducción de al menos un 5 %, de las emisiones de estos gases en 2008-2012 en comparación con las emisiones de 1990. Esto no significa que cada país se comprometía a reducir sus emisiones de gases regulados en un 5 % como mínimo, este es un porcentaje correspondiente a un compromiso global y cada país suscribiente del protocolo tenía sus propios compromisos de reducción de emisiones.

se estimó estaría entre 1 a 2°, sin embargo por no contar con la densidad adecuada de estaciones climáticas, no pudo ser generado un mapa de temperaturas del país.

Los dos Modelos Climáticos seleccionados por el MARN en la Primera Comunicación fueron el UKTR y CCC-EQ, los cuales bajo un escenario Climático Intermedio; de emisión de GEI SRES-A2 y sensibilidad climática media y tres lapsos futuros centrados en 2020, 2040 y 2060, arrojaron una variación de la precipitación de un -5% en 2020 a -25% en 2060 y cambios de temperatura que irían de +0,3°C en 2020 a +3,5°C en 2060.

Los modelos presentaban las mayores diferencias espaciales al norte, y las mayores diferencias temporales en el trimestre Marzo-Mayo. Ambos modelos señalaban un futuro más seco de Junio a Febrero en la franja central del país, de los Andes a los Llanos Orientales y norte de Bolívar, en el extremo sur de Bolívar y extremo norte de Zulia. En la zona norte-costera, que concentra la mayoría de la población y las industrias del país, el futuro lucía preocupante; según el UKTR pasaría a llover menos de 1.200 mm/año. El CCC-EQ, por el contrario, señalaba un ligero aumento de la lluvia en esa zona, pero simuló menos lluvia al occidente del país. Ambos modelos simulaban menos lluvia al sur, lo que pudiera implicar un cambio severo en el ecosistema de selva tropical.

Por último se concluía en esta primera comunicación, que el clima futuro más plausible para el país era más seco y cálido que el actual, que podrían presentarse más sequías e incendios forestales, con expansión del área bajo riesgo de certificación, con eventos de lluvia más extremos.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2007), publica el Cuarto Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático. Según este informe los combustibles de origen fósil mantendrían, según las proyecciones, su posición predominante en el conjunto de las energías mundiales hasta más allá de 2030. Por consiguiente, las emisiones de CO2 procedentes de la utilización de energía aumentarían entre un 40% y un 110% entre 2000 y 2030.

En este informe se tenía un grado de confianza más alto que en el Tercer Informe de Evaluación, respecto de las pautas de calentamiento proyectadas y de otros aspectos de escala regional, como los cambios en las pautas de viento, en la precipitación, y en ciertos aspectos de los valores extremos y de los hielos marinos.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2007) publica el informe “Exploración de Nuevos Escenarios Para el Análisis de las Emisiones, del Cambio Climático, de sus Impactos y de las Estrategias de Respuesta”, el cual constituyó la culminación de los esfuerzos conjuntos del comité director sobre nuevos escenarios, de un equipo de autores compuesto principalmente por miembros de la comunidad de investigación, y de otros numerosos participantes en la reunión y los examinadores externos.

Tanto en reuniones anteriores del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático sobre escenarios, como en el proceso de planificación de la reunión de expertos participaron diversos grupos de usuarios, que pueden clasificarse en dos grandes grupos: “usuarios finales”, es decir, responsables de políticas y decisores que utilizan resultados de escenarios y se inspiran en ellos para adoptar diversos tipos de decisiones; y “usuarios intermedios”, es decir, investigadores que utilizan escenarios construidos por otro segmento de investigación como aportes a su trabajo.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014), publica el Quinto Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático 2013 - 2014, donde se informa que cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850. Es probable que el período 1983-2012 haya sido el período de 30 años más cálido de los últimos 1400 años en el hemisferio norte, donde es posible realizar esa evaluación (nivel de confianza medio). Los datos de temperatura de la superficie terrestre y oceánica, combinados y promediados globalmente, calculados a partir de una tendencia lineal, muestran un calentamiento de 0,85 (0,65 a 1,06) °C, durante el período 1880-2012.

Las emisiones antropogénicas totales de GEI han seguido aumentando entre 1970 y 2010 con mayores incrementos absolutos entre 2000 y 2010, a pesar del creciente número de políticas de mitigación del cambio climático. Las emisiones antropogénicas de GEI en 2010 alcanzaron la cifra de $49 \pm 4,5$ GtCO₂-eq/año. Las emisiones de CO₂ procedente de la combustión de combustibles fósiles y los procesos industriales contribuyeron en torno al 78% del aumento total de emisiones de GEI de 1970 a 2010, con una contribución porcentual similar para el aumento experimentado durante el período de 2000 a 2010 (nivel de confianza alto).

Desde el Cuarto Informe de Evaluación ha aumentado la evidencia de la influencia humana en el sistema climático. Es sumamente probable que más de la mitad del aumento observado en la temperatura media global en superficie en el período de 1951 a 2010 haya sido causado por la combinación del incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero y de otros forzamientos antropogénicos. De acuerdo con las mejores estimaciones, la contribución de la actividad humana al calentamiento es similar al calentamiento observado durante el mencionado período.

Los resultados multimodelos muestran que para limitar el calentamiento total provocado por el hombre a menos de 2 °C respecto del período 1861-1880 con una probabilidad de >66%, sería necesario limitar las emisiones acumuladas de CO₂ procedentes de las diversas fuentes antropogénicas desde 1870 a unas 2900 GtCO₂ (con un rango de 2550 a 3150 GtCO₂ dependiendo de los impulsores climáticos distintos del CO₂). Hasta 2011 ya se habían emitido unas 1 900 GtCO₂.

En relación con 1850-1900, las proyecciones apuntan a que es probable que, para el final del siglo XXI (2081-2100), la temperatura global en superficie sea superior en 1,5 °C para los escenarios RCP4,5, RCP6,0 y RCP8,5 (nivel de confianza alto). Es probable que dicha temperatura sea superior en 2 °C para los escenarios RCP6.0 y RCP8.5 (nivel de confianza alto), y más probable que improbable que sea superior en 2 °C para el escenario RCP4.5 (nivel de confianza medio), pero es improbable que sea superior en 2 °C para el escenario RCP2.6 (nivel de confianza medio).

Es muy probable que las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y duren más, y que los episodios de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes en muchas regiones. El océano se seguirá calentando y acidificando, y el nivel medio global del mar continuará elevándose.

Los cambios en la precipitación no serán uniformes. Es probable que en las latitudes altas y en el océano Pacífico Ecuatorial se experimente un aumento en la precipitación media anual en el marco del escenario RCP8.5. Es probable que, en el marco del escenario RCP8,5, la precipitación media disminuya en muchas regiones secas de latitudes medias y subtropicales, mientras que es probable que en muchas regiones húmedas de latitud media la precipitación media aumente.

El Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Agua (2017) en la Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, nos proporciona

últimas dos décadas es de casi el doble de lo aumentado el siglo pasado. En la Figura 2.4, se muestra la tasa de incremento del nivel del mar desde 1993 hasta mediados del 2018 con un incremento aproximado de 3,2 mm por año.

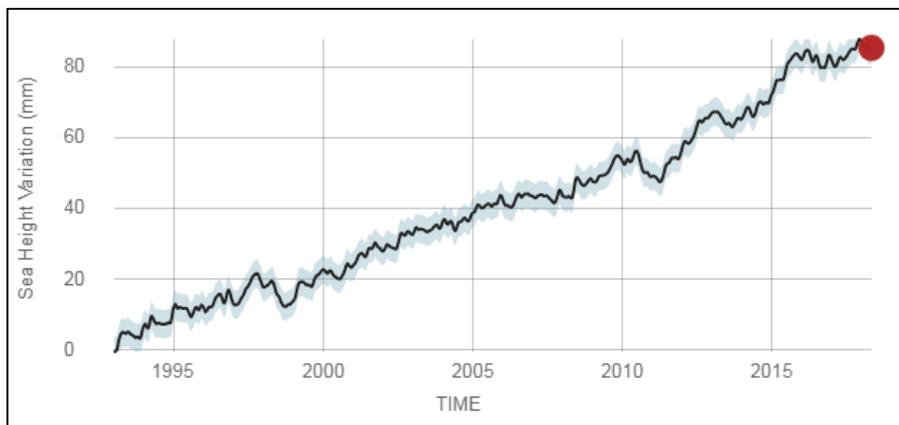


Figura 0.4. Incremento del nivel del mar desde 1993 al 2018. Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

Todo esto sin contar la ocurrencia de eventos extremos, ya sean lluvias torrenciales como sequías extremas, destacando que solamente entre el mes de mayo hasta el mes de agosto del año 2018, se han presentado una gran cantidad de eventos extremos a lo largo de todo el mundo.

En el caso de inundaciones destacan, la falla de la represa de Swar Chaung en Birmania por lluvias torrenciales, la evacuación de más de 6000 personas por fuertes lluvias en Taiwán, desalojo de más de 200000 personas en Somalia por lluvias, inundaciones en el estado de Kerala en la India provocando 223000 personas sin hogar y un saldo de 324 muertos, la crecida del río Raganello en la región de Calabria en Italia provocando la muerte a 10 personas, inundaciones en la provincia de Yen Bai en Vietnam provocando la muerte de al menos 30 personas, inundaciones en los condados de Baltimore y Howard en Maryland EE.UU, la crecida del río Cauca en Colombia provocando el desalojo de más de 600 personas, en Japón fallecieron 75 personas a causas de las lluvias y recibieron la orden de desalojar a más de 5 millones.

En el caso de sequías y altas temperaturas desde mayo a agosto del 2018, destacan los incendios en California catalogados como los mayores en toda la historia del estado, la peor sequía de Alemania desde que se tienen registros, sequía e incendios en Suecia con más de 60 incendios forestales y más de 40 dentro del Círculo Polar Ártico.

Estas son solo algunos de los eventos extremos que se han presentado a nivel mundial en los últimos seis meses, sin tomar en cuenta las tormentas tropicales y huracanes que cada vez golpean con mayor violencia zonas pobladas.

En Venezuela los efectos del cambio climático en los recursos hídricos, se ven asociados a una disminución de la precipitación en la mayoría del territorio nacional con algunas excepciones. Las proyecciones de precipitación de los modelos climáticos globales indican que habrá una reducción de la precipitación anual en la mayoría de las cuencas hidrográficas de Venezuela, según las conclusiones obtenidas en la Segunda Comunicación de cambio climático para Venezuela.

Al ser los modelos creados por diferentes centros de investigación, con diferentes datos, algoritmos e hipótesis sobre el comportamiento futuro de algunas variables los resultados pueden ser completamente disímiles entre sí. Por esta razón, cada uno de los modelos existentes para poder ser utilizados por El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, son sometidos a dos exigentes pruebas, la primera consta de un banco de pruebas de laboratorio donde deben arrojar resultados esperados bajo situaciones controladas. La segunda corresponde a que deben ser capaces de reproducir el clima pasado con un muy bajo margen de error.

El análisis de las proyecciones del clima a través de los modelos climáticos, se puede ejecutar principalmente a través de dos vías.

La primera, es la utilización de un modelo de simulación del clima y desarrollarlo y/o adaptarlo para la zona de interés. Para ello existen los Modelos Acoplados de Circulación General Atmósfera/Océano (MACGAO), que evalúan los diferentes escenarios climáticos que se deseen estudiar. Sin embargo los MACGAO requieren un gran poder computacional, además de la experticia de los investigadores. Esto puede representar una gran dificultad especialmente para los países pobres o para un proyecto en particular. Sin embargo la CMNUCC, a través del Programa de Apoyo a las Comunicaciones Nacionales de los Países, encargó a la Climatic Research Unit de la Universidad de East Anglia (UK) el desarrollo de una metodología simplificada, que es la herramienta MAGICC–SCENGEN (Hulme *et al*, 2000). Este no es el único modelo existente que puede ser aplicado a zonas específicas, por ejemplo también podemos encontrar el PRECIS, desarrollado por el Met Office Hadley creado con la intención de permitir a los usuarios en países en desarrollo el poder producir proyecciones climáticas.

La segunda opción, corresponde a la utilización de los datos generados por los modelos climáticos abalados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático para la quinta comunicación de cambio climático. Estos datos son recopilados y procesados por páginas web como Climate Explorer y WorldClim para su posterior uso, permitiendo descargar la información de todos los modelos utilizados por el IPCC para diferentes intervalos de tiempo y zonas geográficas.

Ambas opciones son válidas y tienen ventajas y desventajas, las cuales se describen a continuación.

2.3.3.1. Magicc/Scengen

El software MAGICC/SCENGEN desarrollado por Wigley, T. (2008), es un modelo climático acoplado para la evaluación de gases de efecto invernadero (inducido por el cambio climático), no requiere un gran poder computacional, haciéndolo especialmente viable para países en desarrollo. Está compuesto por un modelo climático (MAGICC) y un generador de escenarios de cambio climático espacial (SCENGEN). El MAGICC fue uno de los modelos utilizados por el IPCC desde 1990 para producir proyecciones futuras de la temperatura media mundial y del aumento del nivel del mar. El modelo climático en MAGICC es un modelo de surgencia/difusión, de balance de energía, que produce como salida la temperatura media global y hemisférica, junto con los resultados de la expansión térmica oceánica. La versión 5.3 del software es compatible con el Grupo de Trabajo 1 del cuarto informe del grupo intergubernamental de expertos sobre cambio climático. El modelo climático MAGICC se acopla de forma interactiva con una gama de modelos de ciclo de gas que dan las proyecciones para las concentraciones de los gases de efecto invernadero clave. Por lo tanto, las respuestas climáticas en el ciclo del carbono se toman en consideración.

A pesar de ser un modelo “simple”, el MAGICC incluye los componentes atmosférico, oceánico, de criosfera y de química atmosférica (GEI naturales, halocarbonos y sulfatos).

Clima y el proyecto de ECA&D (Evaluación del Clima Europeo y Conjunto de Datos) siguiendo los lineamientos de la OMM (Organización Meteorológica Mundial).

Esta es una herramienta para uso científico en la cual se le pide al usuario que revise que los datos que extrajo para asegurarse que tienen la calidad adecuada para su investigación y que de presentar un problema, se les informe de los errores para ellos poder hacer la revisión correspondiente. Se pide igualmente, que de usarse los datos, se informe dentro de la publicación que los datos provienen del Climate Explorer.

El código del Climate Explorer se puede descargar en forma gratuita y consiste de un conjunto de scripts de Shell así como programas en lenguaje Fortran que se ejecutan bajo los sistemas Linux y Mac OS X.

Dentro de su base de datos, el Climate Explorer contiene los datos empleados por el AR5 correspondientes al Proyecto de intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5). En su base de datos se encuentra los estadísticos del CMIP5, así como los datos obtenidos para cada modelo utilizado y cada escenario estudiado. El usuario puede descargar los datos para su región de interés, en el intervalo de tiempo que lo necesite.

Esta aplicación web es interactiva, contiene en su primera columna el modelo a utilizar, en la segunda el escenario a analizar, que varía desde datos históricos hasta los escenarios correspondientes a los RCP26, RCP45, RCP60 y RCP85, y a partir de la tercera columna hasta la onceava, se selecciona la variable de interés para el usuario. En la Figura 2.6, se observa en detalle la forma y composición de la página, para la búsqueda de información del CMIP5.

Select field Choose a field and press this button										
Surface variables										
model	exp	tas	tas min	tas max	pr	evsp sbl	pme	hurs	taz	psl
CMIP5 mean	rcp26	<input type="radio"/> 1								
	rcp45	<input type="radio"/> 1								
	rcp60	<input type="radio"/> 1								
	rcp85	<input type="radio"/> 1								
	rcp45to85	<input type="radio"/> 1								
	piControl	<input type="radio"/> 1								
CMIP5 mean (one member per model)	rcp26	<input type="radio"/> 1								
	rcp45	<input type="radio"/> 1								
	rcp60	<input type="radio"/> 1								
	rcp85	<input type="radio"/> 1								
	rcp45to85	<input type="radio"/> 1								
	piControl	<input type="radio"/> 1								
all models	rcp26	<input type="radio"/> 32	<input type="radio"/> 31	<input type="radio"/> 31	<input type="radio"/> 32	<input type="radio"/> 30	<input type="radio"/> 30	<input type="radio"/> 27	<input type="radio"/> 31	<input type="radio"/> 32
	rcp45	<input type="radio"/> 42	<input type="radio"/> 41	<input type="radio"/> 41	<input type="radio"/> 42	<input type="radio"/> 40	<input type="radio"/> 40	<input type="radio"/> 35	<input type="radio"/> 42	<input type="radio"/> 42
	rcp60	<input type="radio"/> 25	<input type="radio"/> 23	<input type="radio"/> 23	<input type="radio"/> 25	<input type="radio"/> 24	<input type="radio"/> 24	<input type="radio"/> 24	<input type="radio"/> 25	<input type="radio"/> 25
	rcp85	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 38	<input type="radio"/> 38	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 37	<input type="radio"/> 37	<input type="radio"/> 32	<input type="radio"/> 37	<input type="radio"/> 39
	piControl	<input type="radio"/> 1								

Figura 0.6. Página de entrada para la búsqueda de información del CMIP5 en el Climate Explorer.
Fuente: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (2019)

Existen dos versiones, la versión 2.0 que es la más nueva pero solo tiene información de condiciones actuales, y la versión anterior la 1.4, la cual si contiene los tres grupos de información anteriormente descritos.

Los datos disponibles en WorldClim, corresponden a las proyecciones climáticas del CMIP5 de los modelos climáticos globales (GCM) para cuatro rutas de concentración representativas (RCP). Estas son las proyecciones climáticas de GCM más recientes utilizadas en el AR5 del IPCC. La salida de los GCM, se redujo en escala y se calibró (se corrigió el sesgo) utilizando WorldClim 1.4 como clima "actual" de referencia.

Los datos están disponibles en diferentes resoluciones espaciales (expresadas como minutos o segundos de un grado de longitud y latitud): 10 minutos, 5 minutos, 2.5 minutos, 30 segundos. Las variables incluidas son la temperatura mensual mínima y máxima, la precipitación y las variables "bioclimáticas".

Los periodos de tiempo varían según el grupo. Para Condiciones Actuales los datos resultan del promedio del periodo comprendido entre 1960 - 1990, para Condiciones Futuras los periodos de tiempo analizados son 2050 (promedio entre 2041 – 2060) y 2070 (promedio entre 2061 – 2080) y para Condiciones Pasadas los datos son para el Holoceno Medio (hace unos 6000 años) y para el Último Máximo Glacial (hace unos 22,000 años).

Los datos se encuentran en formato GeoTIFF y se descarga como un mapa mensual para cada variable, de todo el planeta. Esto representa un inconveniente, ya que primero, no se tiene acceso a la información que permitió la creación del mapa, los datos numéricos (deben extraerse con un software de información geográfica) y en el caso de Condiciones Futuras, solo genera información puntual de los años 2050 y 2070, mas no del periodo completo de la serie de datos mensuales. Sin embargo como se mencionó anteriormente sobre el artículo que sirvió de apoyo teórico, es la herramienta más usada a nivel mundial, por tener una resolución de aproximadamente 1Km². En el caso de los datos de precipitación, los resultados de WorldClim se encuentran dentro del GeoTIFF en mm/mes.

En resumen, el WorldClim es una herramienta muy eficaz y popular por su alta resolución, sin embargo se descartó su uso para la generación directa de datos futuros, ya que solo genera un año de información (2050 y 2070), insuficiente para un estudio de disponibilidad de agua. En esta investigación se empleó como apoyo para la correlación entre las estaciones climáticas seleccionadas.

2.3.3.4. Resumen

De manera de facilitar la comprensión de los métodos utilizados para el análisis del clima en el presente estudio, se realizó la Tabla 2.2, la cual contiene las ventajas y desventajas de cada una de las opciones anteriormente explicadas.

2.4. Estimación de demandas en un sistema de riego

Uno de los puntos principales en el desarrollo de un sistema de riego, es la estimación de sus demandas de riego en función a los cultivos que allí decidan sembrarse, teniendo que definir que cultivo se adapta más a las condiciones geomorfológicas del lugar.

Al planificar el funcionamiento de un sistema de riego tomando en consideración los efectos que el cambio climático pueda tener en la zona, es indispensable considerar que estos rubros inicialmente

2.5. Definición de términos básicos

Cambio Climático: Se define como el cambio a gran escala en el sistema climático que tiene lugar en algunos decenios o en un lapso menor, persiste (o se prevé que persista) durante al menos algunos decenios y provoca importantes alteraciones en los sistemas humanos y naturales. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014).

Clima: El clima se suele definir en sentido restringido como el estado promedio del tiempo y más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante periodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años. El periodo de promedio habitual es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial. Las magnitudes son casi siempre variables de superficie (p. ej., temperatura, precipitación o viento). En un sentido más amplio, el clima es el estado del sistema climático en términos tanto clásicos como estadísticos. Ob.cit.

CMIP3 y CMIP5 (CMIP3 and CMIP5): Fases tercera y quinta del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP3 y CMIP5) que coordinan y archivan simulaciones de modelos climáticos basadas en datos de entrada compartidos por grupos de elaboración de modelos de todo el mundo. El conjunto de datos de modelos múltiples de la CMIP3 incluye proyecciones que utilizan escenarios del IE-EE. El conjunto de datos de la CMIP5 incluye proyecciones que utilizan las trayectorias de concentración representativas. Ob.cit.

Cuenca hidrográfica: es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un punto de salida. Aparicio, F. (2010).

Escenario climático: Representación plausible y en ocasiones simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas internamente coherente definido explícitamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropógenos, y que puede introducirse como datos entrantes en los modelos de impacto. Las proyecciones climáticas suelen utilizarse como punto de partida para definir escenarios climáticos, aunque estos requieren habitualmente información adicional, por ejemplo sobre el clima actual observado. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014).

Forzamiento radiativo: Variación, expresada en $W m^{-2}$, de la irradiación neta (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa o en la parte superior de la atmosfera, debida a una variación de un impulsor externo del cambio climático; por ejemplo, una variación de la concentración de dióxido de carbono o de la radiación solar. A veces los elementos impulsores internos se siguen considerando forzamientos incluso aunque se deban a su alteración en el clima, como las modificaciones de los aerosoles o los gases de efecto invernadero en los paleoclimas. El forzamiento radiativo tradicional se calcula manteniendo fijas en un valor no perturbado todas las propiedades de la troposfera y dejando que las temperaturas estratosféricas, una vez perturbadas, se reajusten hasta alcanzar el equilibrio dinamicorradiativo. Ob.cit.

Modelo climático: Representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas. El sistema climático se puede representar mediante modelos de diverso grado de complejidad; en otras palabras, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en

CAPÍTULO 3

ESTUDIO DE CASO

El Sistema de Riego Las Majaguas fue un proyecto concebido y ejecutado por el antiguo Ministerio de Obras Públicas (MOP), como parte de la gestión del presidente Rómulo Betancourt.

El sistema tenía previsto dos etapas constructivas, sin embargo solo se llegó hasta la primera etapa sin su culminación total.

Durante este tiempo, el sistema de riego Las Majaguas, era operado por el MOP, quien se encargaba en acuerdo con los productores, del manejo completo del sistema, respetando la siembra de los rubros para el cual había sido diseñado.

En la actualidad el Sistema de Riego Las Majaguas es manejado por la empresa Socialista de Riego las Majaguas, labor que ejecuta desde el año 2008, bajo la inspección del Instituto Nacional de Desarrollo Rural.

El Ministerio del Poder Popular Para el Ecosocialismo y Aguas, se encarga del manejo de las tomas en los ríos Cojedes y Sarare y del manejo del embalse Las Majaguas. A partir de allí entra en acción la Empresa Socialista del Sistema de Riego Las Majaguas, la cual se encarga de solicitar la cantidad de agua necesaria durante cada época de riego al Ministerio. Para estimar la demanda de agua la empresa realiza inventarios con anticipación, donde se define la cantidad de hectáreas a regar por cada rubro. Los productores deciden que rubros van a sembrar. Luego la misma empresa socialista, se encarga del manejo y distribución del agua a cada uno de los productores, con ayuda de técnicos hidrómetros, que son contratados durante la época de riego.

Los productores del sistema de riego se encuentran organizados, aprovechando tecnologías de información como WhatsApp, dentro de los grupos participan los alcaldes de las poblaciones aledañas, personal de la empresa socialista, funcionarios del ministerio, comandantes de la guardia nacional y por supuesto, los productores. Por medio de grupos de este tipo, mantienen comunicación constante y a tiempo real de los posibles percances que ocurran dentro del sistema, ya sea la necesidad de operar una válvula, informar riesgos de crecidas y/o solicitar apoyo en caso de alguna emergencia, entre otros.

El sistema cuenta con oficinas en el centro de la población de San Rafael de Onoto, donde se concentra el personal de la Empresa Socialista Las Majaguas y los técnicos del Ministerio de Ecosocialismo, para solucionar problemas del día a día, ya que se encuentran en constante comunicación, sirviendo estas instalaciones para las reuniones con los productores en los casos en que se amerite.

3.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el estado Portuguesa entre los ríos Cojedes y Sarare, formando parte de los municipios Páez, San Rafael de Onoto y Agua Blanca, tal como se puede observar en la Figura 3.1. El área se enmarca en una poligonal de aproximadamente 31.228,62 Km², que comprende las obras de captación de los ríos Cojedes y Sarare, el área de almacenamiento denominado embalse Las Majaguas y las obras de distribución del Sistema de riego.

- **Geología**

La superficie del estado Yaracuy, está dominada por la ancha y profunda fosa tectónica que separa los dos sectores montañosos de la entidad. Tiene aproximadamente 90 Km de longitud y una anchura variable entre 14 y 24 Km.; correspondiendo la misma a la cuenca del río Yaracuy, la cual está ubicada al noroeste de la región transicional del país, denominada Región Centro - Occidental, de gran complejidad geológica y fisiográfica.

De acuerdo al Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (1983), en el estado Yaracuy afloran importantes formaciones destacando el Complejo Yaritagua, la formación Aroa y la formación Mamey.

Por otra parte, de acuerdo al Mapa Neotectónico de Venezuela, geológicamente el estado pertenece a la Placa del Caribe, presenta un sistema de fallas transcurrentes, inversa y con actividad del cuaternario que lo atraviesan, compuesto principalmente por la falla de Boconó, la de Oca, así como la falla de la Victoria. Compañía de Ingeniería para Estudios y Proyectos en Aguas y Ambiente (2014).

- **Geomorfología - relieve**

El área de estudio se encuentra ubicada en la región fisiográfica cordillera de la Costa Central, la cual se distribuye en parte de los estados Lara, Yaracuy, Carabobo, y Cojedes entre otros.

De acuerdo a Elizalde, G. Vilorio, J. y Rosales, A. (2007), los tipos de configuración predominantes en esta región natural, son las serranías de alturas medias y bajas en estadio de evolución madura a senil, valles intra e intermontanos en forma de V con fondo estrecho, o con fondos anchos rellenos de sedimentos frecuentemente dispuestos en terrazas.

El relieve se caracteriza por presentar dos sectores montañosos bien definidos que están separados por la depresión Turbio-Yaracuy, valles, piedemontes y una llanura costera.

- **Suelos**

De acuerdo a la Compañía de Ingeniería para Estudios y Proyectos en Aguas y Ambiente (2014), las características generales de los suelos en la zona en estudio es la siguiente:

- Partes medias (500-1.000 m.s.n.m) donde predominan los suelos tipo III, IV y VII. En general son de drenajes externo rápido e interno moderado, de texturas medias: arenosas y arcillo limosas. Son suelos originados por conos de deyección o abanicos de esplayamiento.
- Partes altas (1.000-2.000 m.s.n.m) donde predominan los suelos tipo I, II, III, IV y VII. Son suelos bien drenados de texturas medias y francoarenosos, poco profundos. Existe una pequeña proporción del área de montaña con bosque con drenaje externo rápido.

En relación al potencial agrícola, el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (1983), establece que las tierras ubicadas en el piedemonte de Aroa y alrededores de Sabana de Parra (depresión Turbio-Yaracuy) tienen como principal restricción la topografía (pendientes se ubican entre 8 y 20%), y el relieve es muy disectado; otra limitante es la baja fertilidad, presentando además en algunos sectores, pedregosidad en el perfil.

- **Vegetación**

Las condiciones de suelo y clima en estado Yaracuy han permitido el desarrollo de una exuberante vegetación, que ha propiciado la declaratoria de parte de su territorio como área protegida.

- **Suelos**

La Compañía de Ingeniería para Estudios y Proyectos en Aguas y Ambiente (2014), presenta una descripción de los suelos del estado Lara. A continuación se presenta un resumen de la información contenida en dicho estudio.

En general los suelos del estado Lara son definidos por el clima seco donde existe un déficit hídrico por más de nueve meses al año. Son variables en profundidad, de textura fina predominante, poco permeable y con problemas de salinidad y susceptibles a degradarse, en las áreas con mayor precipitación (parte sur, este y oeste del estado), los suelos son de profundidad variable de mediana a baja fertilidad y texturas variables.

Aquellos suelos ubicados entre altitudes de 600 msnm – 1.100 msnm son poco profundos, aunque relativamente estables y de regular productividad. En el resto del área los suelos en su mayoría se han formado en los sedimentos aluviales recientes de los principales cauces de agua, considerándose de alta vocación agropecuaria.

- **Vegetación**

En el estado Lara se pueden identificar diferentes formaciones vegetales, dadas las distintas combinaciones de las variables ambientales que se dan en esta zona tropical. En el caso particular del área de estudio, correspondiente a las cuencas de los ríos Turbio y Sarare, ubicadas hacia el Sur y el Sureste de la entidad; la cobertura vegetal está principalmente conformada por bosques, matorrales, sabanas y cultivos.

3.1.2. Información cartográfica

Se trabajó con cartas del Instituto Venezolano Simón Bolívar a escala 1:100000 para la delimitación de cuencas y mapas de ubicación, así como cartas 1:25000 para la ubicación de estaciones de medición hidroclimáticas y elaboración de isólinas de precipitación y evaporación.

Toda esta información fue validada por visitas a campo e imágenes de Google Earth.

3.1.3. Información hidroclimática

La selección de las estaciones se realizó en función de su ubicación, ya sea dentro o en las cercanías de las cuencas en estudio (Sarare y Cojedes hasta las tomas del embalse Las Majaguas), la cantidad de años de registro (estaciones con más de 10 años de información) y la calidad de los datos (bajos porcentajes de datos faltantes y englobados).

3.1.3.1. Información climática

La información climática, se obtuvo del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas, obteniendo en una primera selección un total de 79 estaciones en función de su cercanía al área de estudio, tal como se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 0.1. Estaciones climáticas encontradas

SERIAL	TIPO	NOMBRE ESTACIÓN CLIMATICA	AÑO INICIAL	AÑO FINAL	AÑOS DE REGISTRO
2208	PR	MAPORAL	1956	2007	51
1268	PR	DUACA	1942	2007	65

Tabla 0.1. Estaciones climáticas encontradas (continuación). Fuente: elaboración propia

SERIAL	TIPO	NOMBRE ESTACIÓN CLIMATICA	AÑO INICIAL	AÑO FINAL	AÑOS DE REGISTRO
1313	PR	EL HACHA	1959	2007	48
2139	PR	SABANA GRANDE-GUAGO	1940	2007	67
2268	C3	EL TOCUYO-DOS CERRITOS	1974	2007	33
1330	PR	ALBARICO-ESCUELA GRANJA	1964	2007	43
2266	PR	OSPINO-LA ESTACION	1951	2005	54
1321	PR	CAYURE	1960	2007	47
1265	PR	BOBARE	1947	2007	60
1272	PR	BANCO DE BARAGUA	1962	2007	45
1274	PR	GUADALUPE	1962	2007	45
2204	C2	QUIBOR	1945	2007	62
2219	PR	MIRACUY	1969	2007	38
2227	C1	PASO ANGOSTURA	1968	2007	39
2231	PR	CASPITO	1968	2007	39
1238	C2	MOROTURO	1950	2007	57
1354	C1	GUARABAO	1969	2007	38
1385	PR	MIRANDA-LA TRINIDAD	1941	2005	64
2288	PR	LAS DELICIAS	1968	2007	39
6332	PR	EL TRIGAL	1969	2007	38
1227	PR	LAS GUABINAS	1977	2007	30
1362	PR	CAMPO ELIAS	1947	2001	54
2236	PR	RIECITO	1969	1984	15
6359	PR	LA MARROQUINA	1970	2006	36
6360	PR	PASO VAQUIRA	1970	2007	37
1343	C3	SAN FELIPE	1940	2004	64
2226	PR	CAPILLA BUCARAL	1968	2007	39
2362	PR	GUAYABITO	1956	1983	27
1280	C3	EL CULEBRERO	1978	2007	29
1300	PR	SAN FELIPE-PLANTA	1975	2005	30
6374	PR	FILA EL TORITO	1970	2001	31
2333	PR	LA CEIBA-CAMORUCO	1955	1983	28
1346	PR	SAN FELIPE-OFICINA	1951	2005	54
1342	PR	GUAMA	1949	1983	34
2303	PR	LA SIERRA	1941	2000	59
6358	PR	LA PENITA	1970	1983	13

En La Figura 3.2, se puede observar un mapa con la ubicación de las estaciones climáticas e hidrométricas identificadas en la segunda selección y en el cual se pueden apreciar las cuencas de los ríos Cojedes y Sarare.

Se emplearon tres criterios para la selección de las estaciones. El primero según su ubicación geográfica, partiendo de aquellas estaciones dentro o cercanas a las cuencas en estudio, a las cuales se le aplico la metodología de los Polígonos de Thiessen, para estimar el área de influencia de cada estación y de esta manera poder eliminar aquellas estaciones que no influyen en las cuencas, tal como se aprecia en la Figura 3.3.

El segundo criterio, se realizó en función de los años de registro de cada estación, seleccionando solo aquellas estaciones con más de 10 años de longitud de registro continuo, cuyos periodos de información coincidan con los datos de evaporación encontrados. Y la tercera, correspondiente a la calidad de la información encontrada, desechando aquellas estaciones con altos porcentajes de datos faltantes y englobados.

3.1.3.2. Información hidrométrica

La información hidrométrica permite calibrar los parámetros del modelo de simulación hidrológica (SIHIM), para lo cual se utilizó la información hidrométrica del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas. Solo se encontraron dos estaciones para el río Sarare y dos estaciones para el río CojeDES, tal como se pueden observar en la Tabla 3.2. Sin embargo al analizar los periodos de información, fue necesario descartar la estación Agua Blanca en la cuenca del río Sarare, por la falta de datos de precipitación que coincidieran con el periodo de dicha estación. Por otro lado se descartó la estación Cabimba en la cuenca del río CojeDES, por encontrarse muy alejada del punto de cierre de la cuenca.

Tabla 0.2. Estaciones hidrométricas encontradas. Fuente: elaboración propia

SERIAL	TIPO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA	AÑO INICIAL	AÑO FINAL	AÑOS DE REGISTRO	RÍO
0370	11	SARARE	1950	1988	38	SARARE
0372	11	AGUA BLANCA	1942	1966	24	SARARE
0115	11	SAN RAFAEL DE ONOTO	1942	1963	21	COJEDES
0441	11	CABIMBA	1967	1981	14	COJEDES

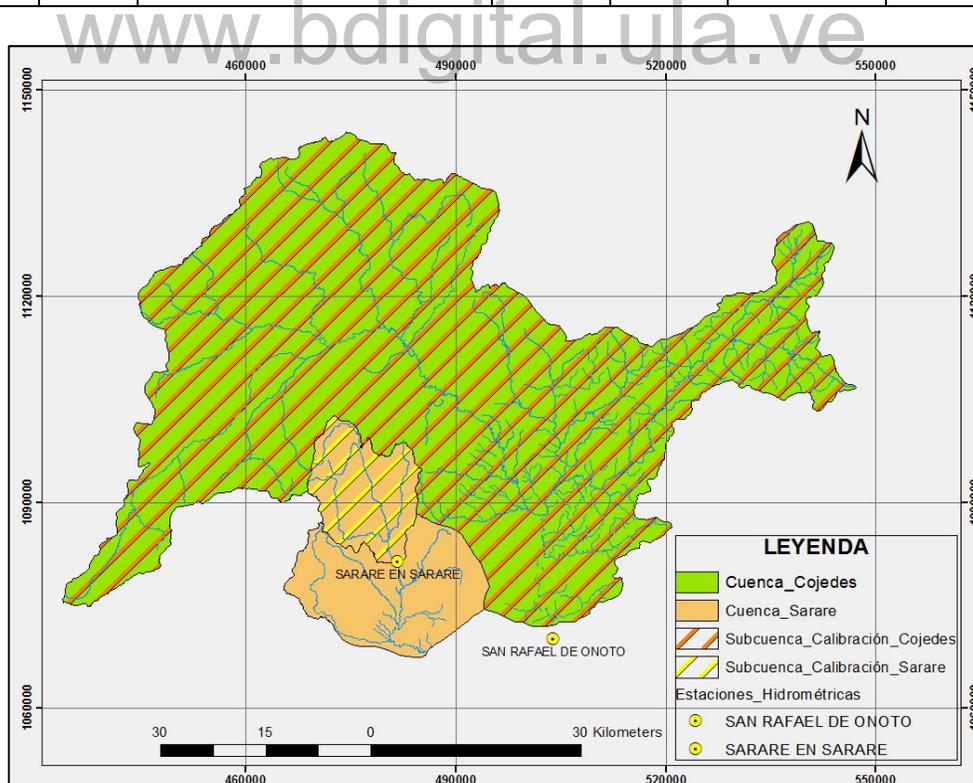


Figura 0.4. Ubicación de estaciones hidrométricas cuenca CojeDES y Sarare. Fuente: elaboración propia

Actualmente, el sistema de riego Las Majaguas riega anualmente cerca de 12100 Ha contabilizadas, en las cuales se siembra principalmente: caña de azúcar, arroz y pasto, en la temporada comprendida entre los meses de noviembre a mayo.

3.2.1. Descripción de la operación del sistema de riego

El sistema de riego Las Majaguas está dividido en tres principales procesos, las captaciones, el almacenamiento y la entrega.

Las captaciones de agua del sistema, se realiza a través de dos canales de derivación sobre los ríos Sarare y Cojedes, los cuales circulan a ambos lados del sistema de riego.

Los canales de derivación descargan en el embalse Las Majaguas, convirtiéndolo en el principal almacenamiento de agua del sistema de riego.

Posteriormente se inicia la aducción al sistema de riego, el cual se realiza por medio de dos tomas que se encargan de distribuir el agua hacia dos canales primarios, a partir de los cuales pasan a los canales secundarios y terciarios hasta llevar el agua a cada una de las parcelas definidas dentro del sistema. La operación para la conducción del agua, se realiza mediante un manejo de válvulas que permite aumentar el nivel del agua en los sitios necesarios para que la misma llegue hasta las parcelas más alejadas de las tomas.

Actualmente el sistema de riego presenta deficiencias en su operación, motivado principalmente a la falta de válvulas tanto en las tomas de los ríos, en las del embalse y principalmente en la distribución, que ocasionan que el sistema no trabaje eficientemente, al no poder controlar la cantidad de agua que entra al sistema, ni la cantidad que es entregada a cada productor.

3.2.2. Descripción de las obras de captación

El sistema de riego Las Majaguas es uno de los pocos en Venezuela por su formato de construcción, ya que su embalse se encuentra fuera del lecho del río, contrario de cómo trabajan la mayoría de los embalses, los cuales se construyen taponando el río en una “garganta” (dos cerros en ambos lados del río). Este sistema cuenta con dos fuentes de agua, el río Sarare que aporta un caudal máximo de 20 m³/s y el río Cojedes que aporta un caudal máximo de 70 m³/s. A continuación se describen los elementos estructurales presentes en cada una de estas captaciones.

3.2.2.1. Río Cojedes

La derivación del río Cojedes se encuentra ubicada a 3 km aguas arriba de la población de San Rafael de Onoto, municipio San Rafael de Onoto del estado Portuguesa, y está conformada por una estructura de regulación y alivio, una estructura de toma de agua y un desarenador, todo accionado eléctricamente.

La regulación de niveles de operación en el sitio de toma y alivio de excedentes de agua, se realiza por un conjunto de compuertas radiales de 4.55 m de altura, que descansan la cresta de un cimacio de concreto de 86.62 m de largo, con 75.8 m ancho útil, ocupados por 6 compuertas de 9 m de ancho llamado vertedero alto, más 4 compuertas de 5.45 m de ancho llamado vertedero bajo. La capacidad de descarga de este conjunto de 10 compuertas es de 1500 m³/s.

La obra de toma la conforman un conjunto de 3 compuertas radiales de 2.2 m de alto y 2 m de ancho, con una capacidad de descarga de 20 m³/s cada una, lo que da origen a un canal derivador trapezoidal de 20 m³/s de capacidad y 5.84 Km de longitud. El desarenador cuenta con un conjunto de 2 compuertas radiales de 5.05 m de alto por 3.75 m de ancho, con una capacidad de descarga de 100 m³/s. En la Figura 3.7, se puede apreciar una vista en planta de la ubicación de la toma.

3.2.3. Descripción del almacenamiento

El embalse Las Majaguas, está conformado por un conjunto de 8 presas homogéneas de tierra, con alturas variables entre 10 m a 20 m, un ancho promedio de la cresta de 5 m y un ancho máximo en la base de 90 m. Sus taludes tienen una inclinación de 3:1 aguas arriba y 2.5:1 aguas abajo, a excepción de las presas 1, 2 y 3 que por ser más bajas, permitió trabajar con taludes aguas arriba de 2,5:1 y aguas debajo de 2:1. En la Figura 3.8, se muestra la ubicación espacial del conjunto de obras que componen el sistema del embalse, la presa, aliviadero, las 2 tomas del río Sarare y del Cojedes, las derivaciones y los canales principales 5 y 7.

El aliviadero se encuentra en una depresión natural ubicada entre las presas 6 y 7. Es del tipo de cresta vertiente de 30 m de longitud, con 27 m de ancho útil, ocupados por 6 compuertas rectangulares que permiten regular el nivel de agua en el embalse a partir de la cota 252.69 msnm hasta la cota 253.79 msnm. En total son 4 compuertas centrales de 4.4 m de ancho, más 2 compuertas laterales de 4,7 m de ancho, diseñadas para soportar una altura de agua de 1,1 m. La capacidad de descarga máxima del aliviadero es de 60 m³/s.



Figura 0.8. Conjunto de obras del embalse: presa, aliviadero, derivaciones, tomas y canales principales.

Fuente: elaboración propia

Al momento de su construcción, la Revista El Agua, publicada por el Ministerio del Ambiente (1976), reportaba que el embalse era capaz de almacenar un volumen de agua de 346,15 millones de m³ hasta su nivel máximo ubicado en la cota 253,79 msnm, con un volumen a nivel normal de 301,63 millones de m³ y una capacidad mínima correspondiente al volumen muerto de 57,17 millones de m³, equivalente al valor estimado de los sedimentos que se depositarían en el embalse durante su vida útil estimada de 100 años.

La curva original en la parte superior presenta una inconsistencia con respecto a las otras dos curvas (se cruza con ellas). Esta situación ocurre en la parte superior de la curva, donde muy probablemente

de emergencia de geometría rectangular deslizante sobre rodillos de 3.07 m por 3.5 m y la otra radial de regulación de 2.6 m de altura y 3.5 m de ancho. La torre toma ubicada en la presa 7, da origen al canal primario M7, que tiene una capacidad de 20 m³/s y 4.8 Km de longitud, mientras que las dos torres tomas ubicadas en la presa 5, dan origen a los canales primarios M5-I y M5-D, cada uno con una capacidad de conducción de 40 m³/s, los cuales se unen a 750 m de la toma formando un solo canal (Canal Principal M5) de 7 km de longitud y una capacidad de 80 m³/s.

El proyecto fue planificado pensando en dos etapas, la primera apoyada en el embalse Las Majaguas y la segunda en el embalse Las Palmas, que estaría ubicado aguas arriba de la toma sobre el río Cojedes y que incrementaría en 60000 ha el área bajo riego. En la Figura 3.10, se muestra un acercamiento en el cual se puede apreciar la distribución y ubicación de los canales M5, M7 y la Quebrada Pirital que separa la zona cubierta por cada canal.

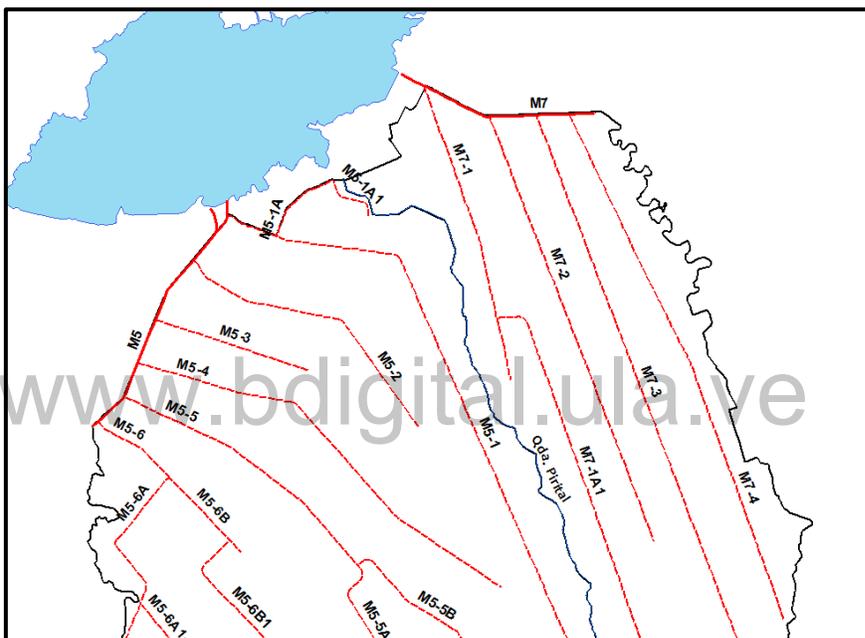


Figura 0.10. Sectores cubiertos por los canales M5 y M7. Fuente: elaboración propia

3.2.4.2. Descripción de los canales del sistema de riego

En el sistema de riego se tienen dos grandes canales pilotos, M5 y M7, de los cuales el M5 serviría al área surtida por Las Majaguas y sería la primera zona a desarrollarse. Aunque el embalse Las Palmas no se construyó, la zona alrededor del canal piloto M7 empezó a consolidarse en forma espontánea con fuente de aguas subterráneas y del propio río Cojedes y otras quebradas y manantiales existentes en la zona.

Existe además un sector aislado, los Ruanos, el cual es un pequeño lote de terreno de 350 Ha. brutas, ubicado entre la quebrada Las Majaguas y Quebrada Honda, y que no está dominado por ninguno de los dos canales primarios mencionados.

- **Sector M5**

El sector dominado por el canal primario M5 se ubica entre el río Sarare y la quebrada Las Majaguas (caño Pirital), ocupando un área de 21.380 Ha. Bruta, equivalentes a 16.035 Ha. Netas, de las cuales

mantenido, destacando que el principal rubro sembrado, es el arroz, seguido de la caña de azúcar, el pasto y por último, otros cultivos que se disgregan entre cacao, maíz y hortalizas. En la Figura 3.12, se puede observar el patrón de siembra por rubros desde 1991 hasta el año 2016.

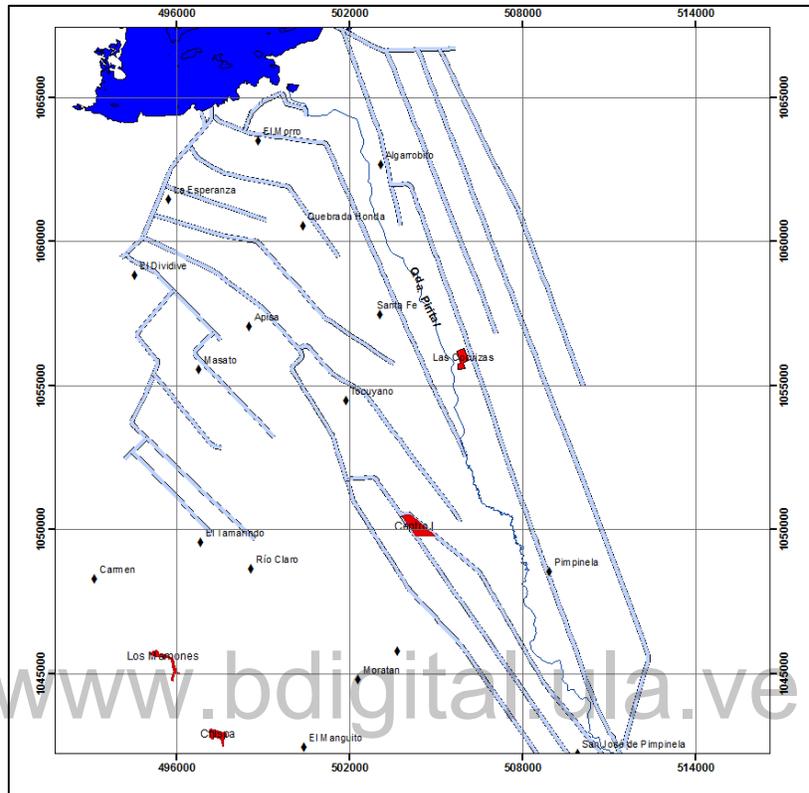


Figura 0.11. Principales aldeas agrícolas existentes en la zona. Fuente: elaboración propia

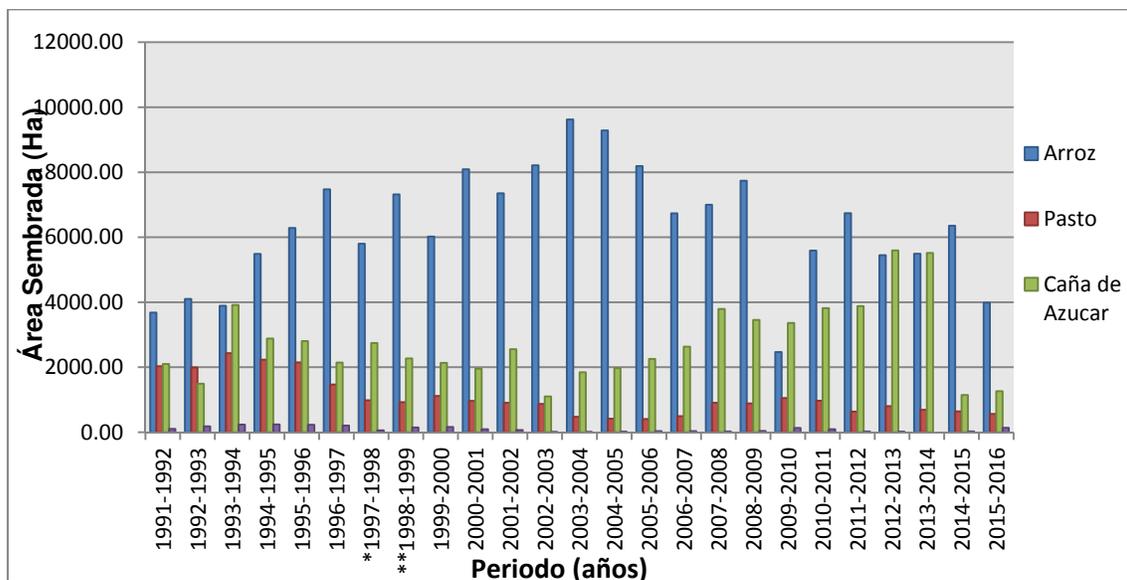


Figura 0.12. Rubros sembrados en el sistema de riego Las Majaguas en la Temporada 1991 – 2016.

Fuente: elaboración propia

plan no se cumple a total cabalidad todos los años, ya que siempre hay una discrepancia entre lo planificado y lo real. En la Figura 3.14, se muestra la eficiencia del sistema en el periodo de 1999-2016, pudiéndose observar que las variaciones son mínimas con el pasar de los años, manteniéndose entre el 60 – 70% a excepción del periodo 2013–2014 en la que la eficiencia bajo hasta 54.47%.

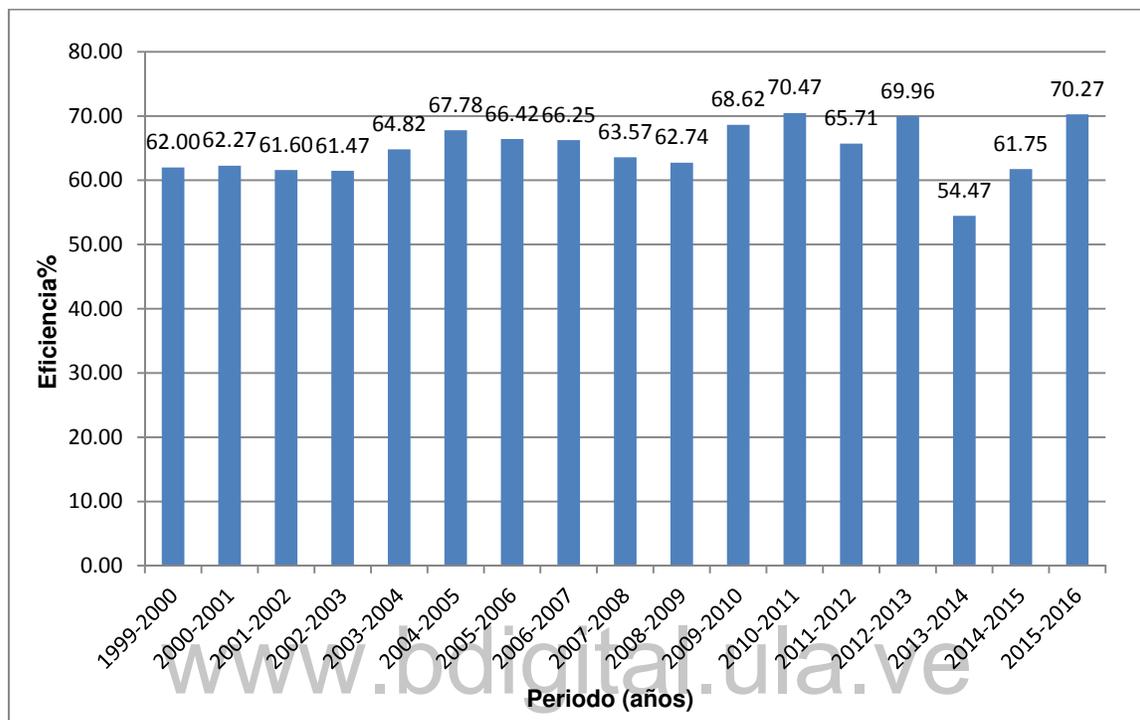


Figura 0.14. Eficiencia en la entrega de agua del sistema de riego Las Majaguas temporada 1999–2016. Fuente: elaboración propia

La manera de definir los rubros a sembrar, es a través de un análisis de la disponibilidad de agua que tendrá el sistema, si la disponibilidad es baja los técnicos deciden aumentar las áreas de riego de los cultivos que representen menor gasto de agua y disminuir aquellos rubros que consumen más cantidad de agua. En el Sistema de Riego Las Majaguas, el rubro que consume menos agua por increíble que parezca es el arroz, al cual solo se le entregan 2lt/s/ha mientras que al pasto y a la caña de azúcar, se le entregan 3lt/s/ha. Esto se debe a que los productores de pasto y caña de azúcar mal gastan el agua, ya que riegan en exceso y no se preocupan por implementar técnicas eficientes de riego, mientras que los productores de arroz, utilizan grandes volúmenes de agua al inicio y final de la siembra, pero en el ínterin, mantienen el agua en el cultivo solo requiriendo aplicar la cantidad de agua que se pierde por evaporación cada cierto tiempo.

En general el sistema fue concebido, como parte del plan para satisfacer la necesidad alimenticia del país. Se encuentra ubicado en una zona apta para el desarrollo agrícola y con el aporte de dos ríos importantes como lo son el Cojedes y el Sarare, que mantienen un flujo continuo durante todo el año, permitiendo utilizar parte se caudal como aporte al sistema de riego. Consta de dos tomas (una en cada río), que derivan a un sistema de almacenamiento, a partir del cual se entrega el agua al sistema de riego, para ser entregada a cada una de las parcelas establecidas en el diseño. Actualmente el sistema trabaja deficientemente y aun en su primera etapa, realizándose el presente estudio con la finalidad de identificar los problemas existentes y como minimizarlos o solucionarlos.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico se realizó, con la finalidad de cumplir el objetivo principal de trabajo, como lo es la “Evaluación del potencial de riego del Sistema Las Majaguas en condiciones de cambio climático”. Para ello fue necesario cumplir a su vez con cada uno de los objetivos específicos que se presentan en el Capítulo I. A continuación se explica la metodología utilizada en esta investigación relacionando cada fase de la misma con el objetivo específico indicado en el primer capítulo.

4.1. Evaluación del funcionamiento actual del sistema de riego Las Majaguas

Corresponde al primer objetivo específico de este trabajo de investigación. Las actividades estarán orientadas a conseguir a partir de una revisión general del estado actual del sistema de riego, evaluar su funcionamiento, manejo y operación, pudiendo identificar las deficiencias dentro del sistema. En la Figura 4.1, se muestra el flujograma utilizado para el desarrollo de este objetivo.

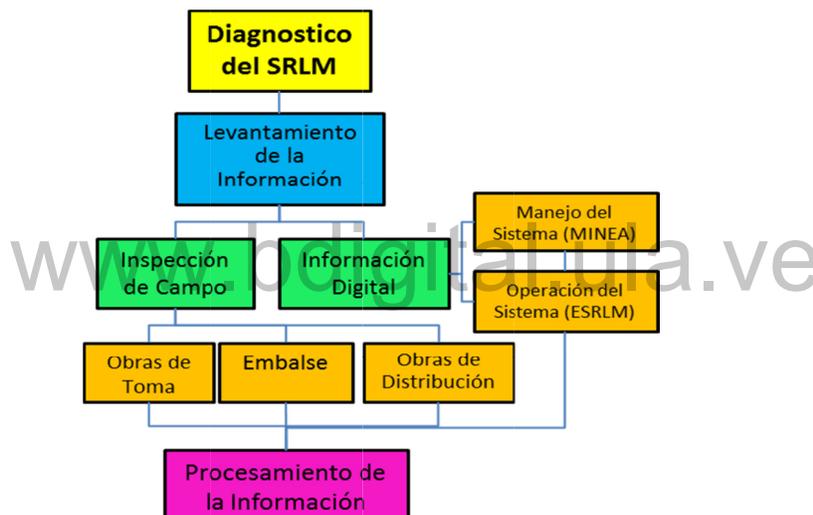


Figura 0.1. Flujograma diagnóstico del sistema de riego Las Majaguas. Fuente: elaboración propia

A continuación, se describen cada una de las actividades necesarias para la evaluación del sistema de riego.

4.1.1. Inventario de toda la Información existente, del sistema de riego Las Majaguas

El primer punto a desarrollar, corresponde a la recopilación de toda la información concerniente al sistema, la cual se obtiene por medio de visitas a campo, revisión bibliográfica, entrevistas con los usuarios y recopilación de datos de los entes responsables del sistema.

4.1.1.1. Visita de campo para levantar la información del funcionamiento del sistema y su estado actual
La visita incluye cada uno de los componentes del sistema de riego, desde las obras de captación y hasta las obras de drenaje.

- Obras de captación.
- Obras de conducción.
- Obra de almacenamiento.

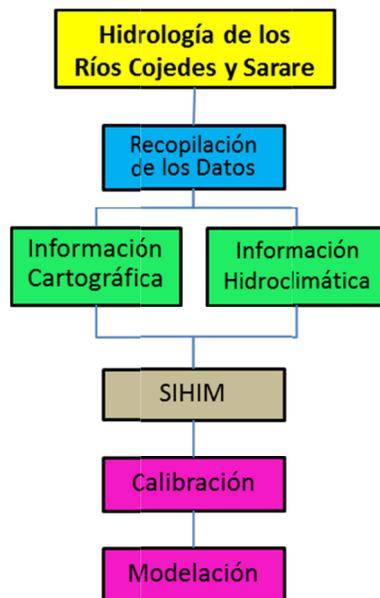


Figura 0.2. Flujograma hidrológica de los ríos Cojedes y Sarare. Fuente: elaboración propia

A continuación se muestran las actividades necesarias para el desarrollo de la hidrología de los ríos Cojedes y Sarare.

4.2.1. Recopilación de la información de las cuencas hidrográficas

Consiste en la recopilación de la información cartográfica e hidroclimática relacionada a los ríos Cojedes y Sarare, cartas del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB) y datos de precipitación, evaporación y caudal del MINEC. De igual manera es necesario realizar una revisión bibliográfica, que permita conocer el comportamiento de toda la zona a lo largo del tiempo, evaluando sus cambios en el uso del suelo, vegetación y cualquier otra información relevante para el estudio.

4.2.2. Procesamiento de los datos cartográficos

El procesamiento de los datos cartográficos, inicia con la digitalización de las cartas del IGVSB, correcciones con las imágenes de Google Earth y la delimitación de las cuencas y subcuencas de los ríos Cojedes y Sarare.

4.2.3. Procesamiento de los datos Hidroclimáticos

El procesamiento de los datos hidroclimáticos se realiza para las variables, precipitación, evaporación y caudal, cada una analizada de forma diferente para cada cuenca.

4.2.3.1. Análisis de los datos de precipitación

Este proceso incluye la selección de las estaciones que se encuentran dentro del área de estudio, descartando luego aquellas estaciones con periodos muy cortos de información y con muchos datos faltantes y/o englobados. Posteriormente es necesario escoger aquellas estaciones con un periodo en común con la estación hidrométrica, de manera de poder calibrar el modelo de simulación mensual. Por último se realiza la completación y desenglobe de datos de las estaciones seleccionadas.

tiempo. El primero hasta el año 2020 y el segundo desde el año 2021 hasta el año 2050, utilizando los datos de la página Web WorldClim para realizar la reducción de escala.

4.3.1. Análisis hidrológico del cambio climático

4.3.1.1. Obtención de los datos climáticos futuros

La información climática futura, se obtendrá de la página web Climate Explorer, la cual genera los datos crudos de los modelos climáticos aprobados por el IPCC para los diferentes escenarios. Sin embargo la misma arroja resultados en una cuadrícula de 0.5° (aproximadamente 50Km²), siendo necesario posteriormente hacer una reducción de escala de los resultados.

4.3.1.2. Selección de los modelos climáticos

Obtenida la información de todos los modelos climáticos del quinto informe del IPCC, procedemos a la selección de los tres modelos que mejor representen los datos históricos medidos. Para ello se calculará el coeficiente de correlación de los datos medidos con los datos históricos de los modelos, seleccionando los tres modelos con mejores coeficientes de correlación.

4.3.1.3. Reducción de escala

El proceso de reducción de escala se realizará estimando un factor, que se encarga de relacionar mes a mes cada estación en la que se requiere conocer la información, con una estación ficticia generada con el promedio de las estaciones involucradas. Este proceso se realizará con el apoyo del modelo WorldClim.

4.3.1.4. Simulación de caudales futuros

La simulación de caudales futuros con el SIHIM a partir de las proyecciones obtenidas con los modelos climáticos, se llevara a cabo en dos periodos de tiempo, el primero hasta el año 2020 y el segundo desde el año 2021 hasta el 2050. Se utilizaran los datos de precipitación y evaporación obtenidos con el Climate Explorer.

4.3.1.5. Análisis de resultados para verificar posibles efectos del cambio climático

Con los valores obtenidos, se analizará el comportamiento de los tres modelos climáticos globales seleccionados en el punto de “Selección de modelos climáticos”, para el periodo 2021 al 2050.

4.4. Análisis de las demandas de riego

El cuarto objetivo específico corresponde a identificar si el cambio climático afecta la demanda de riego del sistema Las Majaguas. Para ello es necesaria una estimación de las demandas de riego para los rubros predominantes en el sistema.

Se empleará el software CROPWAT, considerando un escenario actual y un escenario futuro comprendido en el periodo desde el año 2021 al 2050. En la Figura 4.4, se muestra el flujograma utilizado para el desarrollo de este objetivo.

CAPÍTULO 5

DIAGNOSTICO ACTUAL DEL SISTEMA DE RIEGO LAS MAJAGUAS

Olmecca (2009) presenta un recuento de la evolución de los sistemas de riego en Venezuela luego de la creación del Ministerio del Ambiente en 1977 y la ocurrencia de la crisis económica del país al caer el precio del petróleo en la década de los 80s.

En 1977 se crea el Ministerio del Ambiente (MARNR), el cual se hace cargo del manejo de los embalses de agua en el país, siendo por Ley, el ente encargado de manejar todo lo relacionado a las fuentes de agua. La red de riego queda en las manos del Ministerio de Agricultura y Cría (MAC), que presenta serios problemas internos al dividirse la componente de Operación de los Sistemas de la componente de Mantenimiento, la primera queda con la Dirección de Riego y el mantenimiento va a la Dirección de Infraestructura. En el MOP ambas actividades estaban a cargo de una sola oficina y contaban con presupuesto de funcionamiento para cumplir con sus labores. En el MAC otra de las actividades básicas como era el programa de mejoramiento de estructuras de riego desapareció y el resultado final fue que al disminuir el presupuesto por la crisis económica del país, prácticamente todas las actividades de mantenimiento que funcionaban de forma muy eficiente en el MOP, simplemente dejaron de ejecutarse y lentamente el personal encargado abandonó el Ministerio o se jubilaron.

Para mitigar el problema de las fallas de mantenimiento que se reflejó en la falta de agua, algunos productores comenzaron a perforar pozos mientras que otros se interesaron en algún tipo de actividad como formar parte de las Asociaciones, o colaborar económicamente en los costos para el mantenimiento y operación del sistema. Es importante señalar que dentro del proceso de creación del sistema se apoyó la formación de Asociaciones de Usuarios y Comités de Riego que aún existen y contribuyen a soportar la carga financiera en algunas situaciones.

El estado actual del sistema de riego se describirá en función de los tres principales componentes: fuente de agua (obras de captación), almacenamiento (embalse) y la entrega de agua (obras de riego).

5.1. Obras de captación

Como se mencionó en la descripción, el sistema tiene como fuentes de agua los ríos Cojedes y Sarare, los cuales aportan un caudal máximo de 70 m³/s y 20 m³/s respectivamente, a través de canales que conducen el agua desde el sitio de toma hasta descargar en el embalse. Durante las inspecciones de campo, se pudieron identificar algunos de los problemas existentes en cada toma, los cuales se describen a continuación.

5.1.1. Río Cojedes

La toma en el río Cojedes consta de dos compuertas radiales que operan eléctricamente, actualmente ambas se encuentran operativas. En la Figura 5.1, se puede observar la situación antes (1964) y actual (2017) de dichas compuertas.



Figura 0.3. Compuertas de regulación de niveles y alivio en el río Cojedes. Fuente: Izquierda: (1964); Derecha: elaboración propia (2017)

Con lo observado durante la inspección de campo, se pudo constatar el buen estado y funcionamiento de los 2.878 Km del canal de derivación. En la Figura 5.4, se puede observar la comparación 1964-2017 del estado del canal en la entrada de la toma.



Figura 0.4. Canal de derivación del río Cojedes en la toma. Fuente: Izquierda: (1964); Derecha: elaboración propia (2017)

Se puede concluir que las obras de toma en el río Cojedes se encuentran en un nivel casi aceptable de operatividad, sin embargo hay algunas actividades que son estrictamente de mantenimiento y que es necesario resolver:

- Sustituir las guayas de las tres compuertas radiales que no están funcionando debido al uso.
- Cambio de sellos de las diez compuertas de retención, dos del desarenador y las dos derivaciones.
- Sustitución de guayas 5/8 alma de fibra en las 14 compuertas.
- Mantenimiento del sistema operativo de levante de las compuertas incluyendo alumbrado eléctrico.



Figura 0.6. Entrada a la toma. A la izquierda antes de la limpieza y a la derecha actual. Fuente: elaboración propia

En la Figura 5.6, se puede observar las condiciones en la entrada de la toma antes y después de la limpieza y en la Figura 5.7, se observa el antes (1964) y el actual (2017), de los equipos de control de las compuertas.

Se puede observar en la Figura 5.7, la ausencia de los equipos de control en la actualidad, así como de las barandas de protección.

Con respecto al desarenador, el mismo no está trabajando, debido a la falta de los mecanismos para manejar las compuertas, provocando problemas con sedimentos no removidos. En la limpieza realizada recientemente (1 mes), se limpiaron quedando utilizables, pero dado que no se cuenta con el sistema de manejo de compuertas, van a volver a llenarse de sedimentos. En la Figura 5.8, se puede ver el desarenador luego de culminada su construcción (1964) y como se encuentra en la actualidad (2017).



Figura 0.7. Equipos de control de las compuertas canal de derivación Sarare. Fuente: elaboración propia

derivación Sarare, que va paralelo a este y en algunos puntos le pasa agua por rebose al canal de derivación, tal como se observa en la Figura 5.9.



Figura 0.9. Tubería de rebose del drenaje de Cerro el Loro hacia el canal de derivación Sarare. Fuente: elaboración propia

Este canal natural según informaciones de los técnicos del Ministerio, sirve de drenaje de una microcuenca ubicada en la cercanía llamada Cerro El Loro, cuyo vaso genera unos excedentes de agua que no son contabilizados como volumen de entrada al embalse y que en algunas oportunidades, ha ocasionado el desbordamiento del canal de derivación Sarare, afectando a los habitantes de la población de Agua Blanca. Este canal natural va paralelo al canal de derivación, hasta un punto en que se explaya, exactamente en el punto en que termina el revestimiento del canal de derivación. En la Figura 5.10, se muestran algunas fotos del mencionado canal, mirando hacia aguas arriba y hacia aguas abajo.



Figura 0.10. Canal natural paralelo al canal de derivación Sarare. Izquierda vista aguas abajo, derecha vista aguas arriba. Fuente: elaboración propia

El embalse tiene un aliviadero con una capacidad de descarga de 60 m³/s, el cual está conformado por un total de 6 compuertas, 4 centrales más 2 laterales. En la Figura 5.12, se muestra una foto comparativa entre el estado de las compuertas al inicio de las operaciones (1964) y una foto de su estado actual para el 2017.

El conjunto de obras sigue funcionando después de 53 años con algunas obras de mantenimiento de infraestructura que deberían acometerse en el embalse

5.2.1. En general

Poner en funcionamiento la red de piezómetros y pozos de alivio del embalse y realizar un plan de monitoreo continuo de los mismos, así como de la red de drenaje ubicada al pie de las presas.

5.2.2. Mantenimiento

En la captación del río Sarare hay que limpiar el desarenador y 1.5 km de canal de tierra que se encuentra al final del canal de derivación. NOTA: hay que proteger el embalse que no es muy grande de que se sedimente, si el desarenador no cumple su función va a ser más costoso tratar de corregir luego.

En la captación del río Cojedes hay que sustituir las guayas 5/8 alma de fibra en las 14 compuertas, cambiar los sellos de las diez compuertas de retención, dos del desarenador y las dos derivaciones hacer mantenimiento del sistema operativo de levante de las compuertas incluyendo alumbrado eléctrico y la limpieza de 12 km del canal de derivación y en su desembocadura.

De igual manera se necesita corregir las filtraciones existentes en la presa 5 y presa 7, ubicadas al pie del talud en ambas presas. NOTA: este problema no es nuevo, aparece en el libro de Suarez, L. M. (2002) Incidentes en presas, pero el que no sea grave no implica que puede descuidarse una situación de arcillas dispersivas.

Es necesario realizar un desmalezamiento en el vaso de almacenamiento en las áreas de descarga de los canales derivadores de Cojedes y Sarare.

Compra e instalación de los mecanismos para el manejo de las compuertas del aliviadero, ya que las robaron y actualmente el sistema se opera con las compuertas cerradas para que el embalse alcance la cota 253.79 msnm. NOTA: es muy difícil operar un embalse de la forma como se está haciendo actualmente, y muy probablemente se está perdiendo agua durante la entrega.

5.3. Obras de toma y distribución

En total, hasta la presente fecha, se tiene una red secundaria de canales revestida en concreto de 214,5 Km de longitud, lo que representa el 88% del total proyectado, faltando por construir un total de 28,5 Km, es decir, el 12% del total proyectado.

En cuanto a la superficie desarrollada, dominada o no por canales, se tiene, hasta la presente fecha,, un total de 20.750 Ha netas, lo que engloba las 14.100 Ha netas desarrolladas por el Estado, más las 6.650 Ha desarrolladas por los propios agricultores de Pimpinela, San José y Centro M, faltando por desarrollar 3.700 Ha netas de los centros G, H y K, lo que equivale a 4.930 Ha brutas ubicadas al sur de la carretera

5.3.3. Otras

Existen algunas recomendaciones de Olmedo Ingeniería C.A. (2009), que continúan siendo válidas, tales como la revisión y mantenimiento de la sección a nivel de canales terciarios, contando con la ayuda de la asociación de usuarios. También se necesita mejorar el método de riego de quienes siembran arroz para disminuir el deslave de suelos y el azolvamiento de los canales de drenaje. Es necesario realizar el mantenimiento de las bermas-carreteras, así como poner en funcionamiento las retenciones radiales de canales secundarios, las cuales están fuera de servicio por falta de guayas o de malacate.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 6

HIDROLOGÍA DE LOS RÍOS COJEDES Y SARARE

Se realizó la hidrología de las cuencas Cojedes y Sarare para estimar la disponibilidad de agua aprovechable para cumplir con las necesidades hídricas del Sistema de Riego Las Majaguas, para lo cual, fue necesario desarrollar los puntos que se presentan a continuación.

6.1. Procesamiento de los datos cartográficos

Se procedió a la georreferenciación y digitalización de las cartas del IGSB a escala 1:100000, en las cuales se digitalizaron los cauces y las curvas de nivel de las cartas 6344, 6345, 6442, 6443, 6444, 6445, 6446, 6542, 6543, 6544 y 6545. De igual manera se ubicaron los centros poblados y la vialidad de la zona, así como las estaciones Hidroclimáticas existentes en el área de estudio con sus respectivos años de registro. Esta información fue empleada en la obtención de los factores fisiográficos de la cuenca, necesarios para su modelaje. Por último se utilizaron imágenes de Google Earth, a diferentes años, para conocer el desarrollo de la zona y el cambio en el uso del suelo con el pasar del tiempo.

6.2. Delimitación de cuencas y Subcuencas

La delimitación de cuencas y sub-cuencas se realizó gracias a las capas inicialmente digitalizadas de hidrografía y topografía, así como el chequeo en Google Earth de la información digitalizada, lo que permitió obtener un mejor detalle en la delimitación.

Para la cuenca del río Sarare, se realizó una delimitación para la calibración (hasta la estación hidrométrica) y otra para la modelación (hasta el punto de toma del embalse Las Majaguas), ya que la ubicación de la estación hidrométrica no coincide con en el punto de cierre de la cuenca. Sin embargo para la cuenca del río Cojedes, solo fue necesario realizar una delimitación, ya que la ubicación de la estación hidrométrica (calibración), coincide con el punto de cierre de la cuenca (modelación).

En la Figura 6.1, se muestra la delimitación de las cuencas y subcuencas, utilizadas tanto para la calibración como para la modelación.

6.3. Procesamiento de los datos hidroclimáticos

La información hidroclimática se dividió en tres puntos, en función de la variable meteorológica a medir. A continuación se desarrolla el procedimiento de análisis de cada una de las variables meteorológicas, iniciando con las estaciones de precipitación que se encontraban dentro o en las cercanías del área de estudio.

6.3.1. Análisis de los datos de precipitación

En una primera selección correspondiente al análisis de los datos de precipitación, se escogieron un total de 79 estaciones tal como se pudo observar en la Tabla 3.1, por encontrarse dentro o en las cercanías de la zona de estudio.

Los datos de estas estaciones, fueron obtenidos del Ministerio del Poder Popular de Ecosocialismo y Aguas, de las cuales, muchas se encuentran inactivas en la actualidad. Estos datos vienen en planillas elaboradas por el programa G06, el cual es el utilizado por el Ministerio para procesar los datos

información, para que luego pueda ser utilizada en la completación de datos faltantes y el discretización de datos englobados.

Según Rincón, M. y Rincón, B. (2006), los programas utilizados para el manejo de las bases de datos de precipitación diaria son los que se presentan a continuación, los cuales fueron elaborados en FORTRAN-77.

- ELIMINA.EXE.

Este programa tiene como finalidad eliminar una serie de comentarios en la salida del programa G06 (Utilizado por el Ministerio de Ecosocialismo y Agua para manejar los datos climáticos), que producen una discontinuidad en la información.

Datos de Entrada.

Como archivo de entrada se introduce el archivo proveniente de la base original del programa G06., ejemplo **PD.DAT**

Datos de Salida:

Generalmente se le coloca el mismo nombre del archivo de entrada con extensión **.SAL**, ejemplo **PD.SAL**

- SACAPRE3.EXE.

Este programa tiene como finalidad producir una base de datos en formato de tres líneas, así como la asignación del valor “-1” para datos faltantes y “-2” para datos englobados.

Datos de Entrada:

El archivo de entrada corresponde al archivo de salida generado por el programa **ELIMINA.EXE**, ejemplo **PD.SAL**

Datos de Salida:

El nombre del archivo de salida corresponde al mismo nombre con extensión **.DAT**, ejemplo **PD.DAT**

En líneas generales los pasos que se llevan a cabo en este programa son:

- Dimensionamiento e identificación de las variables.
- Asignación de los días contentivos de cada mes.
- Según sea el formato, se omiten los espacios destinados a la identificación de la institución y solo se lee la información relevante, tal como: tipo de dato, serial de la estación, período, mes.
- Asigna la nomenclatura “-1” para datos faltantes y “-2” para datos englobados.
- Establece el código de mes, en el cual, el número uno (1) se refiere a los diez (10) primeros días del mes, el número dos (2) se refiere a los diez (10) segundos días del mes, y el número tres (3) se refiere a los días restantes.
- Considera si el año es bisiesto al dividirlo sobre cuatro, si este resultado es entero se considera el mes de Febrero con veintinueve (29) días, de lo contrario solo tendrá veintiocho (28).
- Coloca la información diaria según el formato de escritura: (A2,I4,1X,I4,I2,I2,11F6.2) de precipitación expresada en milímetros (mm) en formato de tres líneas, tal y como se aprecia en el ejemplo:

influencia de cada estación y poder eliminar aquellas estaciones que no tienen gran influencia sobre el área.

Posteriormente se realizó un análisis de la cantidad de años de registro con que contaban estas estaciones, con la finalidad de filtrar y escoger aquellas estaciones con más de 10 años de registro continuo y que compartieran el mismo periodo de años con información. Por último, se procedió a verificar la calidad de la información encontrada, desechando aquellas estaciones con altos porcentajes de datos faltantes y englobados.

Luego de esta última elección, se seleccionaron las estaciones para los procesos de calibración y modelación con diferentes periodos de tiempo. Fue necesario realizar esta división, ya que la selección de las estaciones climáticas en la etapa de calibración, dependen del periodo en común que tengan con la estación hidrométrica, el cual en este caso, no fue el mismo que el de la etapa de modelación.

En la Tabla 6.1 y 6.2, se muestran las estaciones seleccionadas para la cuenca del río Sarare y para la cuenca del río Cojedes, respectivamente. Asimismo en la Figura 6.2, se muestra el diagrama de barras con las estaciones seleccionadas para ambas cuencas y sus respectivos periodos de información.

Tabla 0.1. Estaciones seleccionadas para la cuenca del río Sarare. Fuente: elaboración propia

ESTACIÓN		
N°	NOMBRE	SERIAL
PRECIPITACIÓN		
1	MAPORAL	2208
2	LAS DELICIAS	2288
3	LAS CUMBRES	2287

Tabla 0.2. Estaciones seleccionadas para la cuenca del río Cojedes. Fuente: elaboración propia

ESTACIÓN		
N°	NOMBRE	SERIAL
PRECIPITACIÓN		
1	DUACA	1268
2	BARQUISIMETO B/A	1282
3	YARITAGUA	1288
4	CUBIRO	2225
5	LA SIERRA	2303

6.3.1.3. Determinación de datos faltantes y englobados

Los datos faltantes representan vacíos o interrupciones en el registro de datos por diversas razones, mientras que los englobados corresponden a mediciones acumuladas de varios meses, que son reflejadas en un solo mes. En nuestras series de datos, no se encontraron datos englobados, solo datos faltantes.

Para la estimación de datos faltantes, se utilizó la metodología descrita por el Dr. Roger Amisial en su publicación Correlación y Regresión en Hidrología, la cual consiste en realizar una correlación lineal mes por mes entre las 23 estaciones seleccionadas con sus respectivos promedios, creando una estación ficticia correspondiente a la correlación de los promedios. Luego se comparan la estación con datos faltantes con cada una de las 22 estaciones restantes, incluyendo la estación ficticia, evaluando con cual existe mayor correlación y tenga los suficientes datos para completar la faltante. Por último se chequea, midiendo la ganancia o pérdida de información a través de la fórmula de Langbein:

$$N = \frac{Nt}{(1+(Ne/(Nr-2))*(1-\gamma^2))} \quad \text{Ecuación 0.1}$$

Dónde:

- Nt Número total de años
- Nr Número de años con registros
- Ne Número de años faltantes
- γ Coeficiente de correlación

Si N es mayor que Nr se pueden completar los datos faltantes porque se gana información.

En la Tabla 6.3, se puede observar un ejemplo de la correlación realizada en el mes de Enero, así como la estación utilizada para representar los datos de la estación con datos faltantes y su respectivo coeficiente de correlación. Es importante acotar que de manera de tener una mejor estimación de los datos faltantes, se utilizó para este proceso las 23 estaciones que se encuentran dentro del área de estudio, permitiéndonos obtener una mejor aproximación de los valores que al utilizar solo las 8 estaciones seleccionadas por sus registros históricos.

Tabla 0.3. Estaciones modelaje cuenca del río Cojedes. Fuente: elaboración propia

ESTAC	SERIAL DE LAS ESTACIONES																						
	1204	1205	1206	1207	1209	1220	1265	1268	1282	1371	2205	2208	2209	2215	2221	2225	2232	2239	2287	2331	6357	6360	2288
1		0.8232438	0.92371	0.78987	0.65051	0.66813	0.70543	0.71729	0.76114	0.75762	0.78422	0.69057	0.95356	0.69155	0.69946	0.807195	0.74205	0.35491	0.88482	0.3633	0.32144	0.66334	0.59708
2	0.82324		0.79499	0.66832	0.71583	0.5632	0.67775	0.5484	0.71996	0.67107	0.71005	0.63254	0.79981	0.48531	0.57981	0.705269	0.6401	0.34595	0.84428	0.19701	0.3211	0.73596	0.66385
3	0.92371	0.7949933		0.81414	0.63996	0.62874	0.48809	0.64462	0.70372	0.79288	0.84047	0.7962	0.9358	0.56394	0.6757	0.722758	0.86248	0.53572	0.90235	0.4074	0.47193	0.60715	0.74932
4	0.78987	0.668321	0.81414		0.85278	0.56793	0.53166	0.75105	0.79803	0.80324	0.79284	0.64666	0.87007	0.47207	0.65183	0.554802	0.67071	0.50654	0.90095	0.3297	0.40821	0.45249	0.72545
5	0.65051	0.7158256	0.63996	0.85278		0.47566	0.57737	0.65542	0.82352	0.56299	0.63662	0.53474	0.72233	0.3904	0.55829	0.603378	0.54544	0.40547	0.79578	0.27343	0.36254	0.457	0.63201
6	0.66813	0.5632023	0.62874	0.56793	0.47566		0.43245	0.37193	0.45017	0.58589	0.55533	0.57107	0.66122	0.44603	0.53804	0.59871	0.64487	0.31073	0.64752	0.13614	0.30059	0.46798	0.50764
7	0.70543	0.6777514	0.48809	0.53166	0.57737	0.43245		0.73029	0.71645	0.33512	0.43774	0.33722	0.65662	0.7063	0.53718	0.846016	0.28902	0.01553	0.7237	0.34491	0.15038	0.57764	0.15546
8	0.71729	0.5484024	0.64462	0.75105	0.65542	0.37193	0.73029		0.73023	0.49073	0.45478	0.41449	0.71183	0.67242	0.58523	0.677454	0.36659	0.23727	0.71081	0.49039	0.31006	0.53423	0.31448
9	0.76114	0.7199579	0.70372	0.79803	0.82352	0.45017	0.71645	0.73023		0.50519	0.66384	0.53245	0.78702	0.56698	0.61972	0.682427	0.57103	0.35989	0.77581	0.33921	0.29513	0.55174	0.5423
10	0.75762	0.6710696	0.79288	0.80324	0.56299	0.58589	0.33512	0.49073	0.50519		0.75554	0.67425	0.78394	0.29295	0.48773	0.391571	0.64505	0.44429	0.81054	0.16372	0.26815	0.40201	0.67757
11	0.78422	0.7100456	0.84047	0.79284	0.63662	0.55533	0.43774	0.45478	0.66384	0.75554		0.85435	0.87761	0.4547	0.67594	0.48631	0.82336	0.61953	0.91749	0.47987	0.25883	0.41098	0.84293
12	0.69057	0.6325411	0.7962	0.64666	0.53474	0.57107	0.33722	0.41449	0.53245	0.67425	0.85435		0.79903	0.40922	0.69939	0.452992	0.84845	0.72843	0.81028	0.59774	0.29223	0.41047	0.76926
13	0.95356	0.7998079	0.9358	0.87007	0.72233	0.66122	0.65662	0.71183	0.78702	0.78394	0.87761	0.79903		0.65802	0.75091	0.734866	0.81749	0.48325	0.91317	0.49148	0.36099	0.59799	0.6977
14	0.69155	0.4853092	0.56394	0.47207	0.3904	0.44603	0.7063	0.67242	0.56698	0.29295	0.4547	0.40922	0.65802		0.71604	0.816858	0.49171	0.30581	0.65801	0.48665	0.17678	0.52235	0.32789
15	0.69946	0.5798127	0.6757	0.65183	0.55829	0.53804	0.53718	0.58523	0.61972	0.48773	0.67594	0.69939	0.75091	0.71604		0.730262	0.72057	0.69681	0.75922	0.6293	0.36203	0.55022	0.67579
16	0.8072	0.7052691	0.72276	0.5548	0.60338	0.59871	0.84602	0.67745	0.68243	0.39157	0.48631	0.45299	0.73487	0.81686	0.73026		0.58865	0.32051	0.7671	0.42775	0.44709	0.71109	0.39669
17	0.74205	0.6400975	0.86248	0.67071	0.54544	0.64487	0.28902	0.36659	0.57103	0.64505	0.82336	0.84845	0.81749	0.49171	0.72057	0.588649		0.7231	0.86993	0.48203	0.3845	0.43352	0.84781
18	0.35491	0.3459545	0.53572	0.50654	0.40547	0.31073	0.01553	0.23727	0.35989	0.44429	0.61953	0.72843	0.48325	0.30581	0.69681	0.320509	0.7231		0.60477	0.5344	0.42536	0.23209	0.68732
19	0.88482	0.8442794	0.90235	0.90095	0.79578	0.64752	0.7237	0.71081	0.77581	0.81054	0.91749	0.81028	0.91317	0.65801	0.75922	0.767103	0.86993	0.60477		0.38993	0.24481	0.4439	0.93773
20	0.3633	0.1970062	0.4074	0.3297	0.27343	0.13614	0.34491	0.49039	0.33921	0.16372	0.47987	0.59774	0.49148	0.48665	0.6293	0.427755	0.48203	0.5344	0.38993		0.28441	0.18282	0.36311
21	0.32144	0.3210973	0.47193	0.40821	0.36254	0.30059	0.15038	0.31006	0.29513	0.26815	0.25883	0.29223	0.36099	0.17678	0.36203	0.447089	0.3845	0.42536	0.24481	0.28441		0.75956	0.24208
22	0.66334	0.7359637	0.60715	0.45249	0.4357	0.46798	0.57764	0.53423	0.55174	0.40201	0.41098	0.41047	0.59799	0.52235	0.55022	0.711087	0.43352	0.23209	0.4439	0.18282	0.75956		0.30467
23	0.59708	0.6638517	0.74932	0.72545	0.62001	0.50764	0.15546	0.31448	0.5423	0.67757	0.84293	0.76926	0.6977	0.32789	0.67579	0.396691	0.84781	0.68732	0.93773	0.36311	0.24208	0.30467	
PROM	0.92124	0.8245723	0.92517	0.84778	0.75632	0.69597	0.64957	0.70835	0.80363	0.74187	0.86061	0.81772	0.95927	0.6984	0.85278	0.813699	0.8579	0.61507	0.95399	0.53378	0.46602	0.66945	0.77902
max	0.95356	0.8442794	0.9358	0.90095	0.85278	0.69597	0.84602	0.75105	0.82352	0.81054	0.91749	0.85435	0.95927	0.81686	0.85278	0.846016	0.870	0.72843	0.95399	0.6293	0.75956	0.75956	0.93773
EST		PROM	13	PROM	9	PROM			PROM		PROM		PROM		PROM	7	PROM	12	12	PROM	22	21	PROM
COEFIC		0.8245723	0.9358	0.84778	0.82352	0.69597			0.80363		0.86061		0.95927		0.85278	0.846016	0.8579	0.72843	0.81028	0.53378	0.75956	0.75956	0.77902

Tabla 0.8. Parámetros obtenidos en la calibración de la cuenca del río Cojedes.

Fuente: elaboración propia

PARÁMETROS	VALORES
CINF (mm)	200.00
HSN (mm)	140.00
CT	0.72
PQB	0.10
PFSE	0.16
PESC	0.20

6.4.1.2. Sarare

La calibración del modelo SIHIM en la cuenca del río Sarare, se realizó en la estación Sarare serial 0370, tal como se observa en la Figura 6.9.

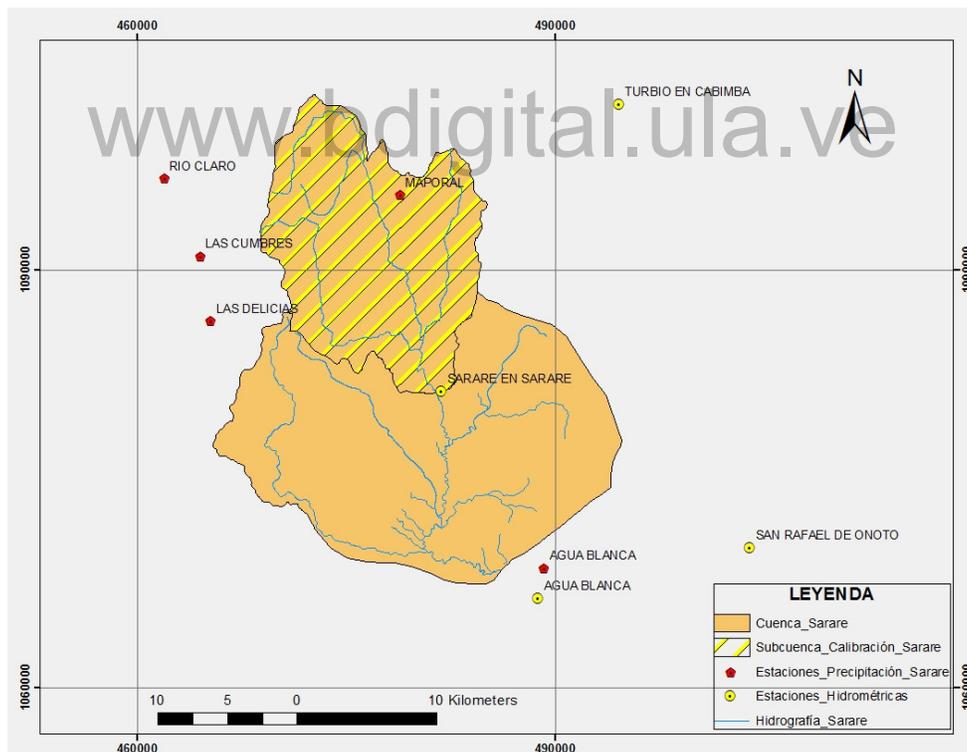


Figura 0.9. Subcuenca del río Sarare hasta la estación Sarare. Fuente: elaboración propia

El periodo utilizado para la calibración fue de 16 años, desde enero de 1968 hasta noviembre de 1978, para un total de 192 meses.

6.4.2. Modelación

Obtenidos los parámetros de las cuencas de los ríos Cojedes y Sarare, continuamos con la modelación, etapa en la cual se obtienen caudales a partir de periodos de información de precipitación y evaporación conocidos, en las mismas estaciones utilizadas durante el proceso de calibración.

La modelación se generó, utilizando los datos medidos disponibles en cada una de las estaciones seleccionadas. En el caso de la cuenca del río Cojedes, el periodo de información disponible fue de 1952 a 1982, para un total de 31 años, mientras que para la cuenca del río Sarare, el periodo de información disponible utilizado fue desde el año 1968 al 2007 para un total de 40 años.

6.4.2.1. Cojedes

La modelación del SIHIM en el río Cojedes, se realizó utilizando las mismas 5 estaciones empleadas durante el proceso de calibración (Duaca, Barquisimeto B/A, Yaritagua, Cubiro y La Sierra), tal como se observa en la Figura 6.11.

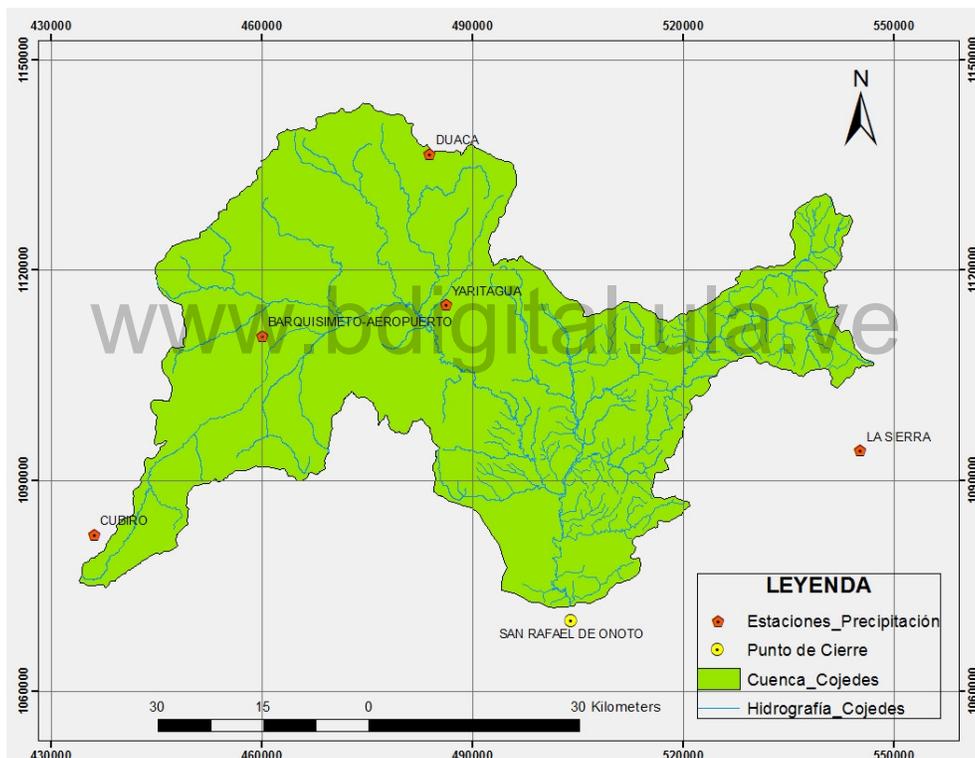


Figura 0.11. Estaciones utilizadas en la modelación de la cuenca del río Cojedes.

Fuente: elaboración propia

Los porcentajes de influencia de las estaciones de precipitación y evaporación son los mismos, al igual que los datos, solo variando el periodo de registro, el cual para la cuenca del río Cojedes es de 31 años, que va desde el año 1952 hasta el año 1982.

Los parámetros utilizados, son los obtenidos durante el proceso de calibración, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 6.8.

Al igual que en la cuenca del río Cojedes, los porcentajes de influencia de las estaciones de precipitación y evaporación son los mismos y los datos solo varían en su periodo de registro, el cual para la cuenca del río Sarare es de 40 años, que va desde el año 1968 al 2007.

Los parámetros utilizados, son los obtenidos durante el proceso de calibración, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 6.10.

A continuación en la Figura 6.14, se puede observar los caudales obtenidos con el modelo SIHIM en el periodo de 1968 a 2007, en el cual se destaca su tendencia ligeramente descendente.

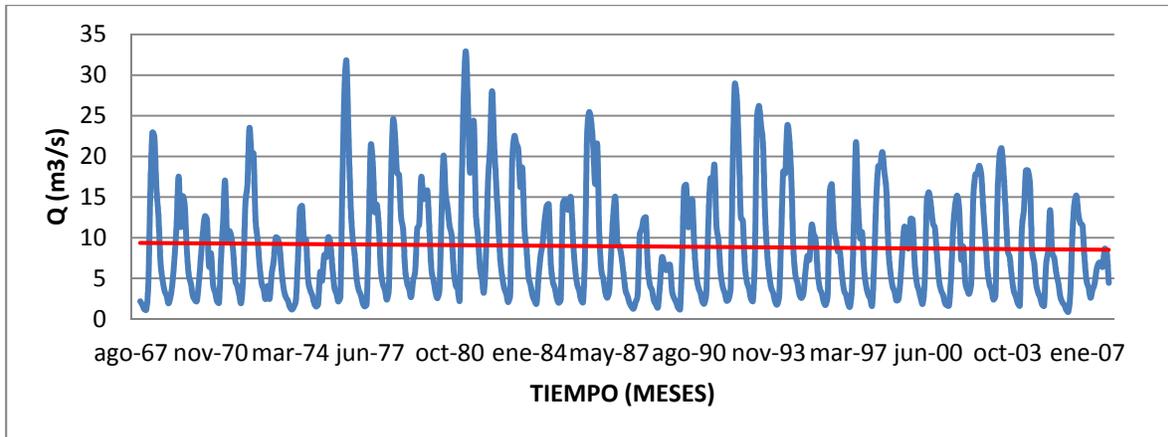


Figura 0.14. Caudales simulados en la cuenca del río Sarare en el periodo 1968-2007.

Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO 7

ÁNÁLISIS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ZONA

Para realizar el análisis del cambio climático en nuestra zona de estudio, utilizaremos la información correspondiente al CMIP5 desarrollada por el IPCC para el AR5 publicado en el año 2014.

Esta quinta publicación del IPCC, plantea cuatro escenarios conocidos como RCP (rutas de concentración representativas), definidas principalmente por la aplicación o no, de medidas para la disminución de los GEI (gases de efecto invernadero).

Los RCP que se analizan en la publicación mencionada son los siguientes:

RCP 2,6, escenario de mitigación estricto, con un forzamiento radiativo que culmine en aproximadamente 3 W/m² para el 2100.

RCP 4,5, escenario intermedio, con un forzamiento radiativo que se estabilice en aproximadamente 4,5 W/m² a partir del año 2100.

RCP 6,0, escenario intermedio, con un forzamiento radiativo que se estabilice en aproximadamente 6,0 W/m² a partir del año 2100.

RCP 8,5, escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero, con un forzamiento radiativo que supere los 8,5 W/m² para el año 2100.

Para efectos del presente estudio, solo se analizó el escenario RCP 4,5 un escenario intermedio, ya que es el que más se asemeja a lo que existe en la zona actualmente, y lo que se esperaría ocurra y se mantenga en la zona en estudio.

El primer paso del análisis de cambio es realizar una validación del modelo climático a utilizar para simular los caudales hasta el año 2020, y seleccionar los modelos climáticos que mejor reflejen el comportamiento actual. Se decidió trabajar con los tres mejores modelos que se ajustaran al periodo histórico. El segundo paso es simular el periodo 2021–2050 para el RCP4.5.

Para el análisis del cambio climático en la zona, se analizaron las variables climáticas precipitación y evaporación, necesarias en la utilización del modelo SIHIM.

Así mismo fue necesario realizar una reducción de escala en los datos obtenidos de la página web Climate Explorer, para lo cual se utilizaron como referencia los datos medidos (para la simulación hasta el año 2020) y datos puntuales obtenidos con el WorldClim (para la simulación en el periodo 2021 al 2050).

7.1. Selección de los modelos climáticos

El proceso de selección de uno de los 19 modelos climáticos de circulación global analizados, se realizó utilizando una comparación de los datos históricos de dichos modelos, con respecto a los datos medidos en nuestra área de estudio. Para ello se trabajó con la página web del Climate Explorer, la cual nos presenta los resultados de los modelos utilizados en el CMIP5, en una grilla de 0,5° x 0,5° para un área específica seleccionada, obteniendo los datos brutos en formato ASCII, cuyos datos pueden exportarse a TXT y posteriormente a Excel.

Tabla 0.1. Coeficiente de Correlación entre los Datos Medidos y los Datos Históricos de los Modelos Climáticos (Continuación). Fuente: elaboración propia

País	Centro de Investigación	Modelo	Coeficiente de Correlación
Japón	Meteorological Research Institute	MRI-CGCM3	0.56
EEUU	NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies)	GISS-E2-R	0.74
EEUU	National Center for Atmospheric Research	CCSM4	0.56
		CESM1(CAM5.1,FV2)	0.59
Noruega	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute	NorESM1-M	0.50
Corea del Sur	National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration	HadGEM2-AO	0.49
EEUU	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-CM3	0.63
		GFDL-ESM2G	0.48

Resaltado en color azul claro, se muestran aquellos modelos cuya correlación con los datos medidos fue de más del 70% (coeficiente de correlación mayores al 0.70).

Luego de identificar aquellos modelos con mejores coeficientes de correlación, se procedió a graficar los datos y agregar una línea de tendencia, de manera de poder identificar cuál de los modelos es capaz de representar de mejor manera, los datos de precipitación de la zona de estudio. A continuación en las Figuras 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4, se muestran los resultados obtenidos de los modelos HadGEM2-Es, MIROC-ESM, MPI-ESM-LR Y GIS-E2-R respectivamente, graficado versus los datos medidos, con sus relativas líneas de tendencia.

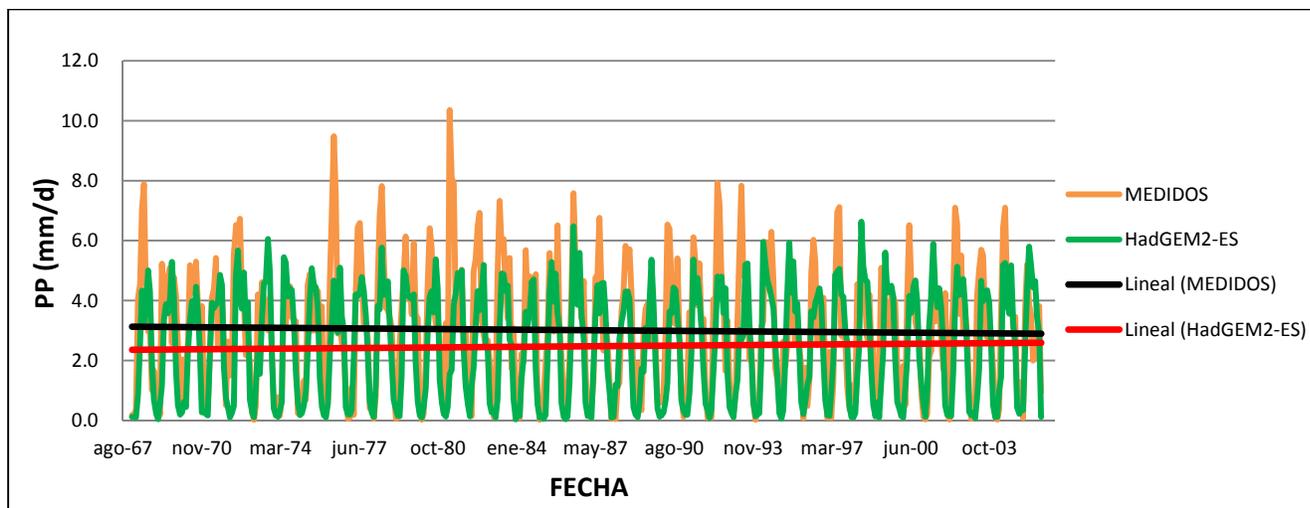


Figura 0.1. Grafica de valores medidos versus históricos del modelo HadGEM2-ES. Fuente: elaboración propia

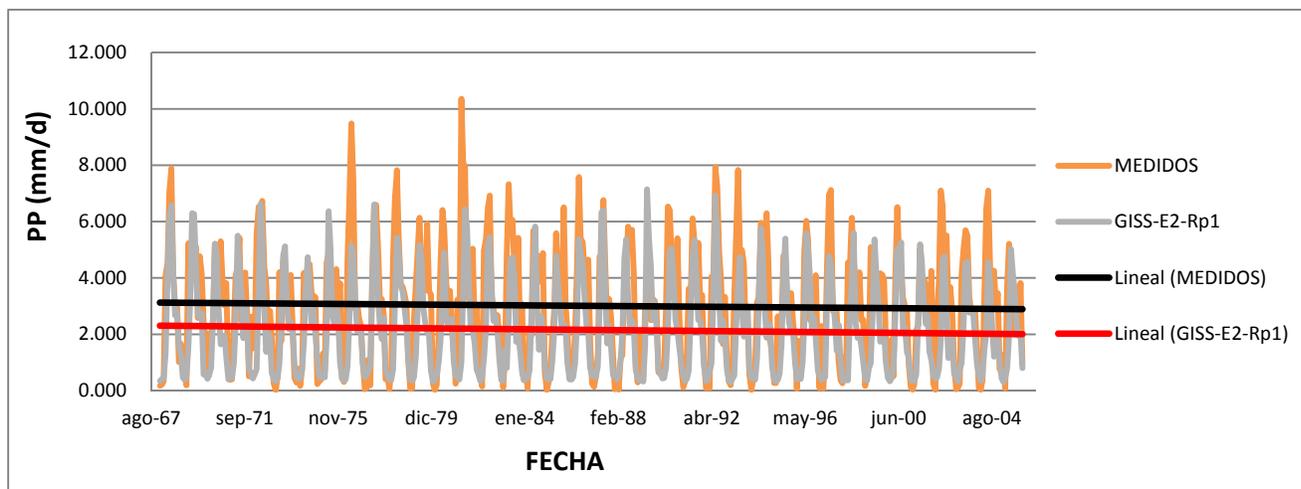


Figura 0.4. Grafica de valores medidos versus históricos del modelo GISS-E2-Rp1.
Fuente: elaboración propia

Al igual que el MIROC-ESM, el GISS-E2-Rp1 representa muy bien datos medidos, y ambas series siguen la misma tendencia pero desfasadas en magnitud.

Luego del análisis de los modelos seleccionados, se escogió el MPI-ESM-LR desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología, con sede en Hamburgo y más de 42 años de fundada, por ser el modelo que mejor representa los datos históricos en nuestra área de estudio, cuyos datos se utilizarán para obtener las variables climáticas hasta el año 2020.

Para el análisis del escenario futuro en el periodo comprendido entre el año 2021 y el año 2050, se utilizarán los tres modelos con mejor correlación con los datos medidos, estos son: MPI-ESM-LR, HadGEM2-ES y GISS-E2-Rp1.

7.2. Modelación

Conocido los modelos de circulación global a utilizar, procedemos a obtener los valores de precipitación y evaporación para nuestros periodos de interés, para lo cual se utilizaron los datos obtenidos con el Climate Explorer, ya que es capaz de generarme el período completo de datos, para el escenario planteado.

Inicialmente se realizó una validación de los datos del Climate Explorer, comparándolo con los datos generados por el WorldClim, para luego proceder a realizar la simulación de mis periodos de interés.

7.2.1. Validación del Climate Explorer

La validación del Climate Explorer, se realizó con los datos de precipitación obtenidos de la página web WorldClim, ya que esta última es una de las más utilizadas a nivel mundial.

Para ello se obtuvieron los datos de precipitación del Climate Explorer en los años 2050 y 2070 (años para los cuales el WorldClim arroja resultados) y compare con los datos obtenidos con el WorldClim para el mismo periodo, modelo de circulación y escenario.

Los resultados obtenidos no coinciden a la perfección, sin embargo podemos observar que siguen el mismo patrón, presentando coeficientes de correlación de 0.93 y 0.84 respectivamente.

Estos resultados muestran que la diferencia entre los datos crudos; obtenidos del Climate Explorer y los datos calibrados a los que se les redujo la escala; obtenidos del WorldClim, no presentan mucha diferencia, sin embargo se puede notar en todas las figuras, que los datos crudos tienen mayores picos que los procesados.

Esta comparación permitió validar el Climate Explorer, ya que al comparar los datos, se obtuvieron valores altos de correlación, generando una mayor confianza al utilizar sus datos en el proceso de modelación.

7.2.2. Reducción de escala

Los modelos de circulación global, simulan el clima en diferentes capas de la atmósfera para pequeños pasos de tiempo y son numéricamente complejos. Para poder realizar cálculos relativamente rápidos y lidiar con las limitaciones de la memoria de la computadora, dividen al mundo en un número limitado de cuadrículas. Por lo tanto, la salida del modelo es bastante gruesa, típicamente del orden de 2 a 3 grados; un grado de longitud es ~ 111 km, convirtiéndose en un problema para los estudios que consideran la variación climática a una resolución espacial mucho mayor. Es por tal razón que para el presente estudio se hace necesario realizar una reducción de escala, llevando los datos obtenidos del Climate Explorer con una salida en cuadrículas 0.5 x 0.5 grados, a valores puntuales en cada una de las estaciones seleccionadas.

La metodología empleada para la reducción de escala, se llevó a cabo calculando un factor multiplicador, el cual relaciona mes a mes cada estación, con el promedio de las estaciones involucradas.

Este proceso se llevó a cabo en dos espacios de tiempo bien marcados, el primero utilizando los datos históricos como base para la reducción de escala, para estimar los caudales hasta el año 2020. El segundo utilizando como base para el cálculo los valores obtenidos con el WorldClim para el año 2040, para estimar los caudales en el periodo 2021–2050. A continuación se explican detalladamente ambos procesos.

7.2.2.1. Datos históricos.

Corresponde a la reducción de escala utilizando como base los datos históricos medidos en cada estación, permitiéndonos obtener el factor por el cual se multiplicarían los datos obtenidos con el Climate Explorer hasta el año 2020 y de esta manera conseguir los valores de precipitación estimados para cada estación.

Para realizar este proceso, se tomaron los datos de las estaciones para un periodo en común, que va desde 1968 a 1982 para un total de 15 años. En la Tabla 7.2, se muestran los factores obtenidos mes a mes, para cada una de las estaciones.

Es importante acotar que con estos factores multiplicadores, se podrán obtener los datos de precipitación en cada estación, que permitirán estimar los caudales en los periodos 1983 -2020 en la cuenca del río Cojedes y 2008 – 2020 en la cuenca del río Sarare.

Tabla 0.4. Factores multiplicadores obtenidos del WorldClim HadGEM2-ES RCP4.5 año 2040. Fuente: elaboración propia

MESES	DUACA	BARQUISIMETO B/A	YARITAGUA	CUBIRO	LA SIERRA	MAPORAL	LAS DELICIAS	LAS CUMBRES
ENERO	2.522	1.345	1.177	5.380	2.522	1.681	4.708	4.708
FEBRERO	1.459	1.592	1.326	4.509	1.194	1.194	3.448	3.581
MARZO	0.478	0.573	0.382	1.243	0.860	0.478	1.051	1.051
ABRIL	1.342	1.368	1.578	2.104	2.289	1.684	2.394	2.315
MAYO	0.984	0.746	1.179	1.406	2.466	1.471	2.066	1.914
JUNIO	0.819	0.529	1.212	1.135	2.150	1.357	1.903	1.672
JULIO	0.961	0.476	1.273	0.961	2.307	1.410	1.657	1.474
AGOSTO	0.611	0.349	0.864	0.629	1.912	0.943	1.179	1.039
SEPTIEMBRE	0.392	0.261	0.473	0.539	1.241	0.580	0.784	0.727
OCTUBRE	0.600	0.487	0.562	0.890	1.386	0.806	1.115	1.068
NOVIEMBRE	1.159	0.825	0.883	1.463	1.709	1.086	1.636	1.622
DICIEMBRE	2.295	1.494	1.655	2.882	2.562	2.242	3.202	3.202

Tabla 0.5. Factores multiplicadores obtenidos del WorldClim GISS-E2-Rp1 RCP4.5 año 2040. Fuente: elaboración propia

MESES	DUACA	BARQUISIMETO B/A	YARITAGUA	CUBIRO	LA SIERRA	MAPORAL	LAS DELICIAS	LAS CUMBRES
ENERO	0.982	0.573	0.491	2.291	1.063	0.654	1.800	1.963
FEBRERO	0.533	0.533	0.445	1.600	0.445	0.445	1.245	1.334
MARZO	0.364	0.510	0.364	1.238	0.728	0.437	0.947	0.947
ABRIL	1.739	1.814	2.041	2.873	3.175	2.230	3.213	3.100
MAYO	1.187	0.859	1.390	1.609	2.858	1.687	2.358	2.202
JUNIO	0.762	0.454	1.061	0.932	1.734	1.094	1.507	1.353
JULIO	0.805	0.387	1.051	0.775	1.818	1.118	1.311	1.177
AGOSTO	0.838	0.459	1.148	0.803	2.364	1.194	1.469	1.320
SEPTIEMBRE	1.066	0.656	1.209	1.291	2.993	1.394	1.886	1.763
OCTUBRE	1.171	0.920	1.088	1.694	2.614	1.527	2.112	2.029
NOVIEMBRE	1.366	0.939	1.025	1.644	1.943	1.217	1.836	1.815
DICIEMBRE	1.598	1.034	1.128	1.974	1.833	1.551	2.209	2.209

7.2.3. Estimación de caudales

Obtenidas las variables climáticas para nuestros dos periodos, realizamos la simulación hidrológica para la estimación de los caudales en ambas cuencas, para los tres modelos climáticos seleccionados y el escenario definido como intermedio. En las Tablas 7.6 y 7.7, se muestra un resumen de los periodos simulados y las estaciones utilizadas para tal fin.

7.2.3.1. Caudales hasta el año 2020

Para este proceso se utilizó el modelo climático MPI-ESM-LR para un escenario RCP 4.5 para las dos cuencas en estudio. La primera correspondiente a la cuenca del río Cojedes con un periodo que va desde el año 1983 al año 2020 para un total de 38 años. La segunda correspondiente a la cuenca del río Sarare, para un periodo que va desde el año 2008 al año 2020 para un total de 13 años.

En la Figura 7.7, se muestran los caudales estimados para la cuenca del río Cojedes hasta el año 2020, utilizando el modelo MPI-ESM-LR, para un escenario intermedio.

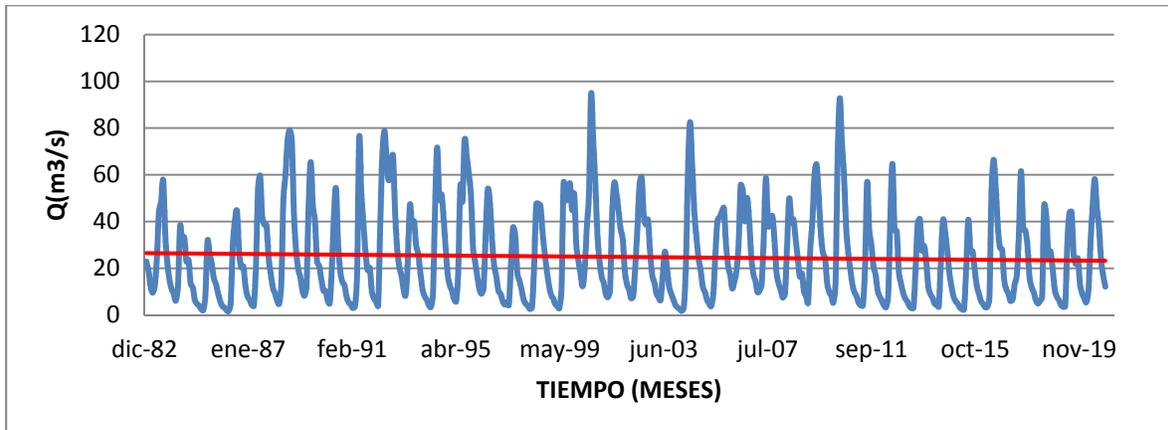


Figura 0.7. Caudales simulados cuenca del río Cojedes en el periodo 1983 - 2020, modelo MPI-ESM-LR, escenario RCP45. Fuente: elaboración propia

En la Figura 7.8, se muestran los caudales estimados para la cuenca del río Sarare hasta el año 2020, utilizando el modelo MPI-ESM-LR, para un escenario intermedio (RCP 4,5).

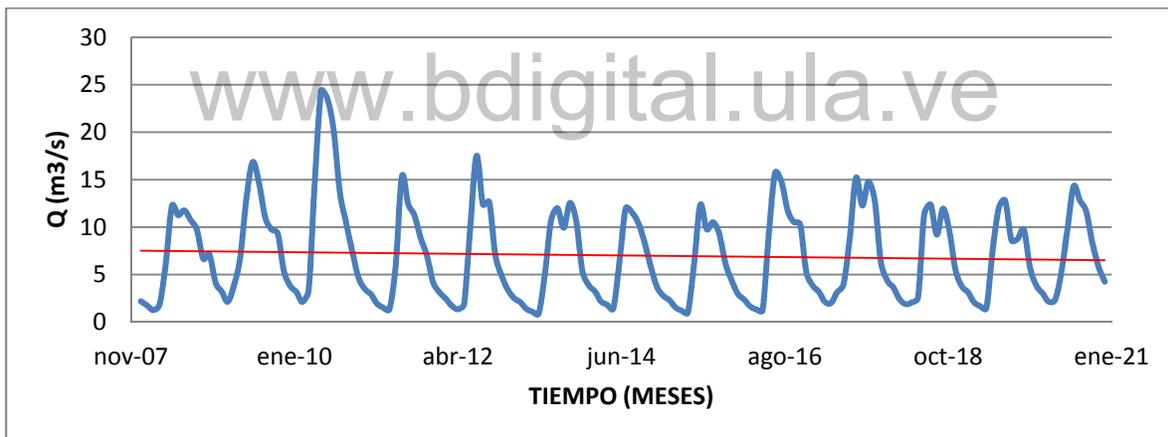


Figura 0.8. Caudales simulados cuenca del río Sarare en el periodo 1983 - 2020, modelo MPI-ESM-LR, escenario RCP45. Fuente: elaboración propia

7.2.3.2. Caudales periodo 2021-2050

Para este proceso se utilizaron tres modelos climáticos, el MPI-ESM-LR, el HadGEM2-ES y el GISS-E2-Rp1, todos para un escenario intermedio.

En las Figuras 7.9, 7.10 y 7.11, se muestran los caudales estimados en la cuenca del río Cojedes para cada uno de los tres modelos climáticos seleccionados.

En las Figuras 7.12, 7.13 y 7.14, se muestran los caudales estimados en la cuenca del río Sarare para cada uno de los tres modelos climáticos seleccionados.

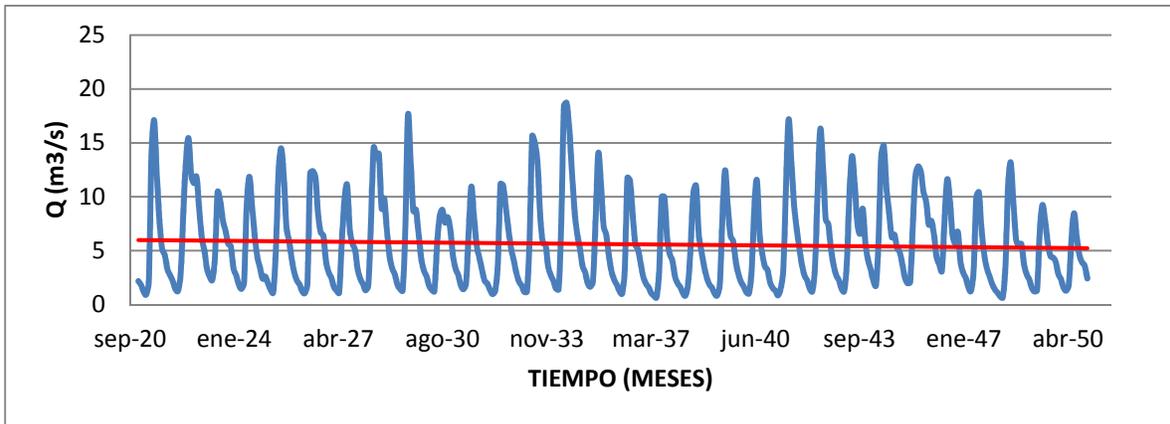


Figura 0.12. Caudales simulados cuenca del río Sarare en el periodo 2021-2050, modelo MPI-ESM-LR, escenario RCP45. Fuente: elaboración propia

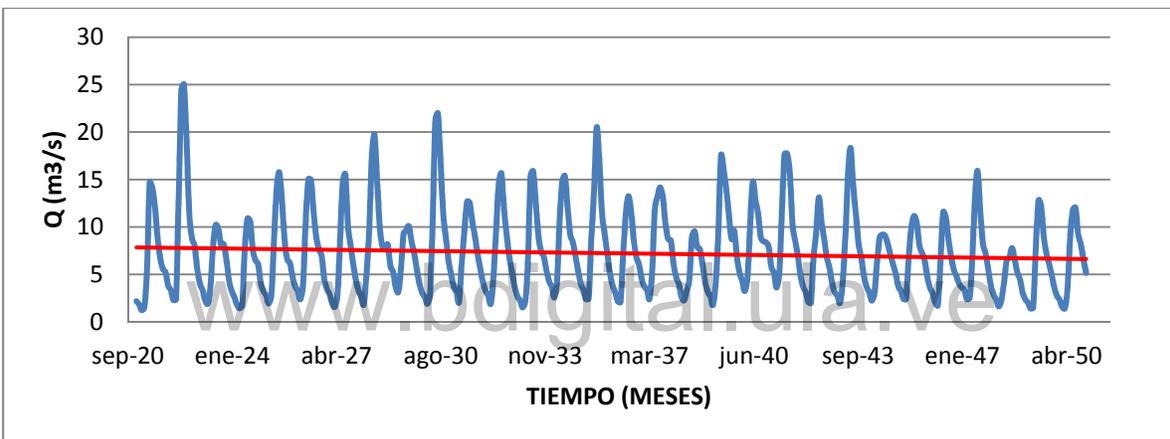


Figura 0.13. Caudales simulados cuenca del río Sarare en el periodo 2021-2050, modelo HadGEM2-ES, escenario RCP45. Fuente: elaboración propia

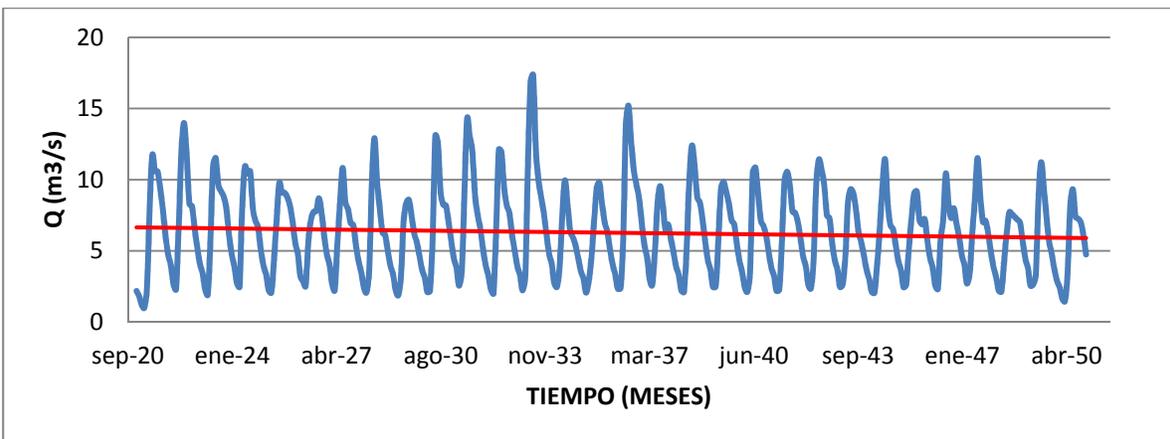


Figura 0.14. Caudales simulados cuenca del río Sarare en el periodo 2021-2050, modelo GISS-E2-Rp1, escenario RCP45. Fuente: elaboración propia

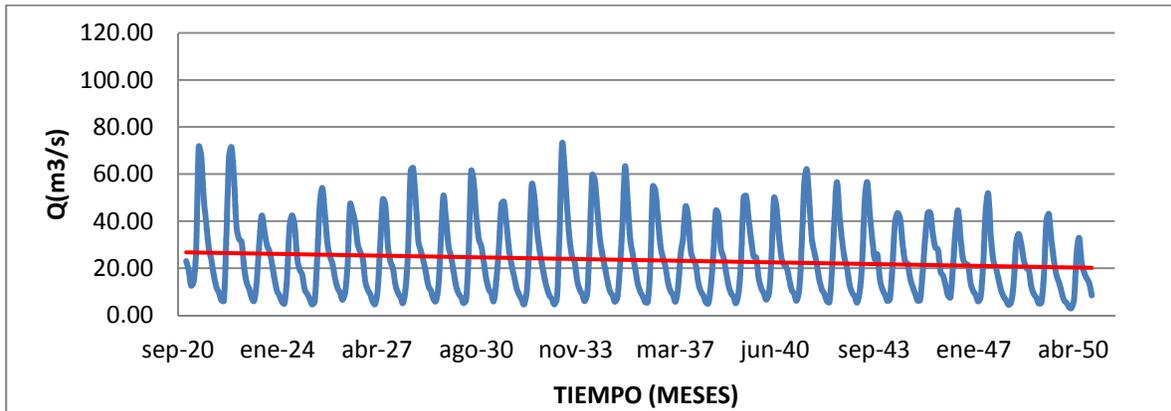


Figura 0.17. Promedio caudales simulados cuenca del río Cojedes en el periodo 2021-2050, escenario RCP45. Fuente: elaboración propia

En el río Cojedes el caudal promedio resultante en el periodo de estudio (2021–2050) es de $23.44\text{m}^3/\text{seg}$, con una disminución de caudal al comparar el promedio del año 2021 con el del año 2050 de 58.73%.

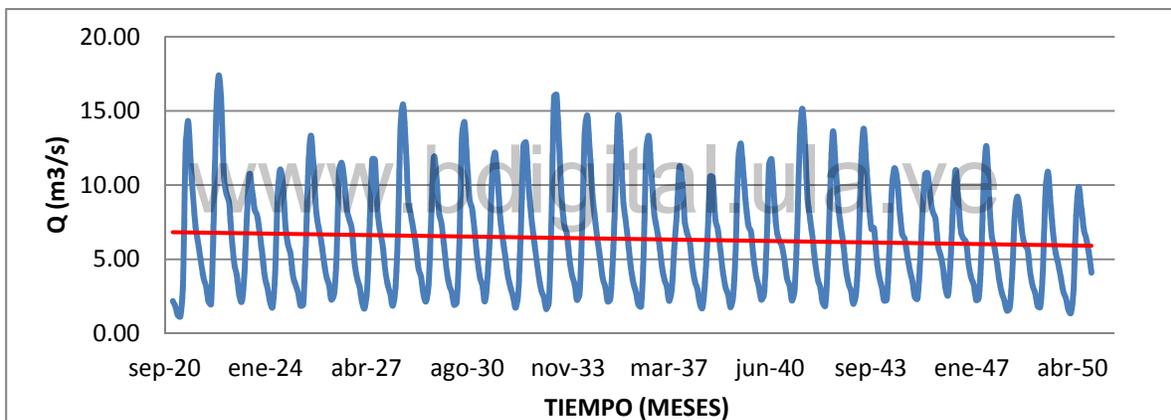


Figura 0.18. Promedio caudales simulados cuenca del río Sarare en el periodo 2021-2050, escenario RCP45. Fuente: elaboración propia

En el río Sarare el caudal promedio resultante en el periodo de estudio (2021–2050) es de $6.37\text{m}^3/\text{seg}$, con una disminución de caudal al comparar el promedio del año 2021 con el del año 2050 de 19.71%.

7.2.4. Análisis Estadístico

Obtenidos los caudales, se realizó el análisis estadístico de las series de datos para los caudales obtenidos de los tres modelos utilizados.

Se analizaron parámetros para medir la tendencia central tales como media, mediana y moda, así como para medir la dispersión, la varianza, desviación estándar y el rango y para medir la simetría de los datos el coeficiente de asimetría.

A continuación en la Tabla 7.8, se muestran los parámetros estadísticos obtenidos para la cuenca del río Cojedes.

Al realizar una comparación entre los parámetros históricos y los correspondientes a cada uno de los modelos utilizados en el periodo 2021–2050, podemos observar lo siguiente:

- Se utilizó la mediana como parámetro para medir la tendencia central, siendo el modelo HADGEM2-ES el que arroja el valor más cercano al histórico.
- La dispersión de los caudales históricos medida por la desviación estándar, es mayor que la generada por los tres modelos utilizados, siendo el modelo HADGEM2-ES el que genera el valor de desviación estándar más cercano al histórico.
- Los coeficientes de asimetría obtenidos son todos positivos, siendo los modelos HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR los que generan los valores más cercanos al histórico.

Podemos indicar que el modelo HADGEM2-ES es el que mejor representa los caudales históricos de ambos ríos (Cojedes y Sarare) en función del análisis de sus parámetros estadísticos.

7.2.5. Análisis de los caudales

Para finalizar, se realizó la comparación de los caudales históricos simulados versus los caudales futuros, de manera de identificar los cambios ocurridos en la disponibilidad de agua por efecto del cambio climático en la zona de estudio.

De manera de poder realizar una comparación entre los caudales de ambos periodos, fue necesario seleccionar los años de información en común para los dos ríos (Cojedes y Sarare), pudiendo definir la disponibilidad de agua utilizando el cálculo de las curvas de duración de caudales, para un caudal con una probabilidad de ocurrencia mayor o igual al 70% del tiempo, el cual es el utilizado para abastecimiento agrícola.

A continuación se presenta en la Figura 7.19, las curvas de duración de caudales para el periodo histórico común para ambos ríos desde 1968 a 1982 para un total de 15 años.

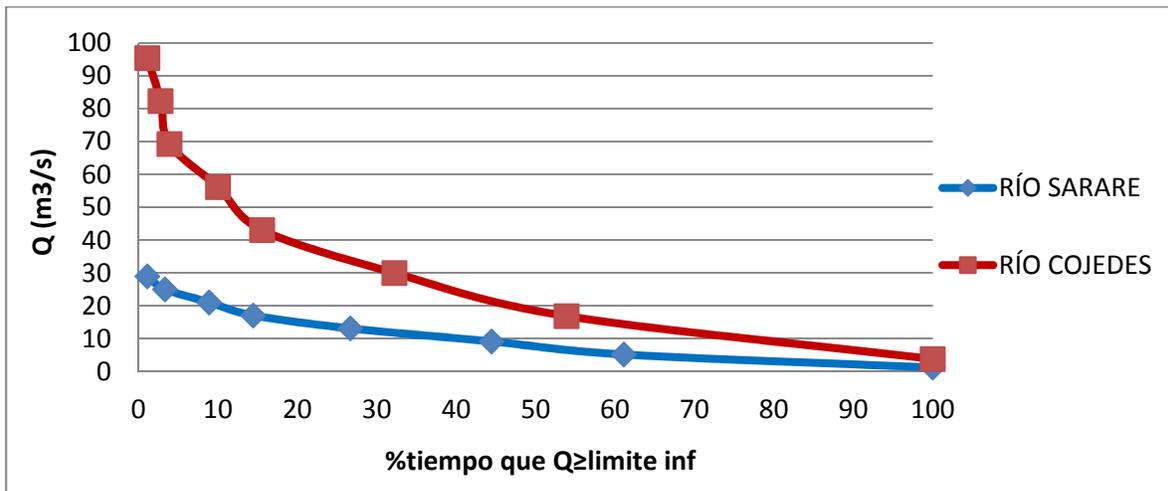


Figura 0.19. Curvas de duración de caudales de los ríos Cojedes y Sarare en el periodo 1968–1982.

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 7.10, se muestran los caudales obtenidos para un 70% del tiempo que el caudal es igual o mayor al límite inferior, para los ríos Cojedes y Sarare en el periodo 1968-1982.

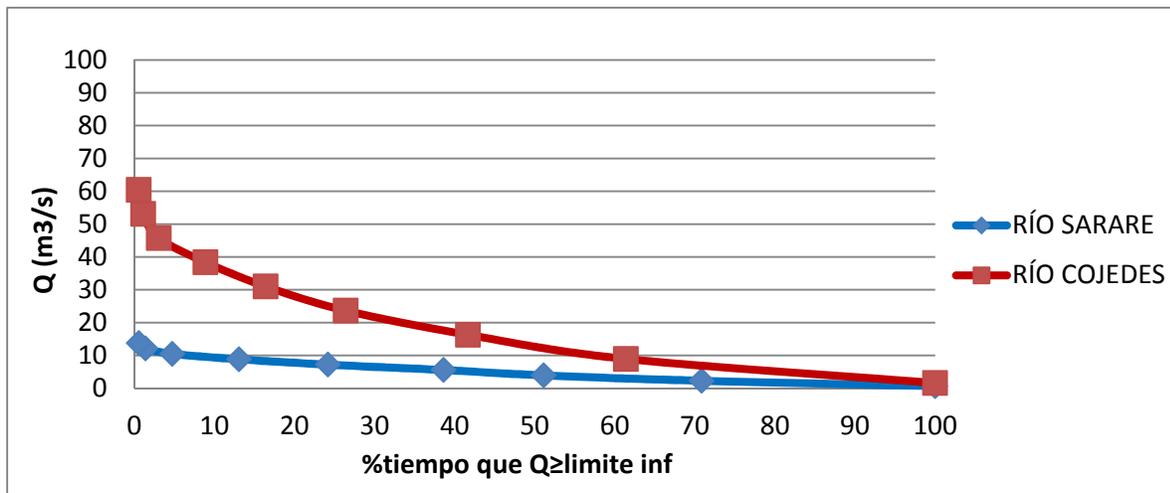


Figura 0.21. Curvas de duración de caudales de los ríos Cojedes y Sarare en el periodo 2021–2050.
Fuente: elaboración propia

En la Tabla 7.12, se muestran los caudales obtenidos para un 70% del tiempo que el caudal es igual o mayor al límite inferior, para los ríos Cojedes y Sarare en el periodo 2021-2050.

Tabla 0.12. Caudales de los ríos Cojedes y Sarare para un 70% de probabilidad de ocurrencia en el periodo 2021-2050. Fuente: elaboración propia

Descripción	Q70 (m3/seg)
Río Cojedes	7.31
Río Sarare	2.36
Total (Q70)	9.67

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS DE DEMANDAS DE RIEGO

Luego de realizar el análisis de la oferta de agua al sistema de riego Las Majaguas, se realizó la estimación de como el cambio climático afectaría las demandas de riego. Para ello se utilizó el software CROPWAT 8.0, analizando los tres cultivos que actualmente se siembran dentro del sistema; arroz, caña y pasto, otorgándoles un porcentaje dentro del área de riego y una eficiencia del 70%.

La metodología de estimación de las demandas de riego se basa en un balance hídrico, teniendo como entrada al sistema los datos de precipitación y como salida la evaporación, pudiendo de esta manera estimar el consumo necesario para cada cultivo, en función de sus necesidades particulares.

Para el análisis de las demandas se realizaron dos procedimientos marcados por dos periodos de tiempo. El primero corresponde a una comparación entre el promedio de los datos desde 2006 al 2016, con respecto al periodo 2021–2050, utilizando el mismo patrón de riego, variando solamente los registros climáticos. Este primer chequeo, nos permite estimar la influencia del cambio climático sobre las demandas de riego, pudiendo conocer si las afecta o no y de hacerlo en que magnitud.

El segundo chequeo realizado consiste en el análisis de tres patrones de cultivos con los mismos rubros, solo variando el porcentaje de área sembrada para cada uno para el periodo 2021-2050. Este análisis nos permitió estimar como afecta a la demanda, la variación de las áreas sembradas de cada cultivo. Cabe destacar que para el presente análisis, no se tomó en cuenta el 1% correspondiente a otros rubros, asignándole este porcentaje al rubro con mayor gasto de agua dentro del sistema que en nuestro caso es la caña de azúcar.

Es importante resaltar que la fecha de siembra utilizada para los tres rubros fue del 11 de noviembre, variando la cosecha en función del cultivo. Para el arroz, el tiempo de cultivo utilizado fue de 4 meses, para la caña de 1 año y para el pasto de 1 año.

8.1. Comparación histórico versus futuro

La comparación entre las demandas históricas y las futuras, nos dan un indicio del posible efecto del cambio climático sobre las variables climáticas, que en nuestro caso representarían un aumento de la demanda por dos razones, la disminución de las precipitaciones y el aumento de la evaporación en la zona.

Para realizar el análisis, se calculó la demanda con el CROPWAT asumiendo un total de área regada de 12100 ha, utilizando un patrón dado por el porcentaje promedio de área regada por rubro en el periodo 1999–2016 y con una eficiencia del 70%, el cual se muestra en la Tabla 8.1.

Tabla 0.1. Porcentajes de área sembrada para el patrón de siembra histórico. Fuente: elaboración propia

Cultivos	% de Área Sembrada
Arroz	64
Caña de Azúcar	28
Pasto	8

8.1.2. Demandas de riego periodo 2021-2050

Esta dado por el mismo patrón de riego pero para el periodo futuro 2021–2050, regando 12100 ha, utilizando datos climáticos obtenidos del Climate Explorer para un escenario intermedio (RCP4.5)

A continuación se muestra en la Tabla 8.3 y en las Figuras 8.3 y 8.4, el déficit de precipitación por cada cultivo y los requerimientos totales del sistema, para el periodo 2021-2050.

Tabla 0.3. Cuadro general de aprovisionamiento del sistema periodo 2021-2050. Fuente: elaboración propia

Descripción/Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Déficit de Precipitación													
CAÑA DE AZUCAR	26.8	19.8	11.8	3.0	0.0	0.0	5.5	45.3	41.2	0.0	0.0	5.3	13.2
ARROZ	38.9	18.8	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.9	210.5	33.4	32.2
PASTO	33.5	16.4	9.0	1.7	0.0	0.0	0.0	26.6	32.0	0.0	0.0	29.1	12.4
Req. Netos sistema													
en mm/día	1.1	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	1.7	4.5	0.8	0.8
en mm/mes	35.1	18.9	6.7	1.0	0.0	0.0	1.5	14.8	14.1	51.8	134.7	25.2	25.3
en l/s/h	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.5	0.1	0.1
Área Irrigada (% del área total)	100.0	100.0	100.0	36.0	0.0	0.0	28.0	36.0	36.0	64.0	64.0	100.0	55.3
Req.de riego área real (m3/s)	1.4	0.8	0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	1.6	1.6	3.1	8.5	0.9	1.5

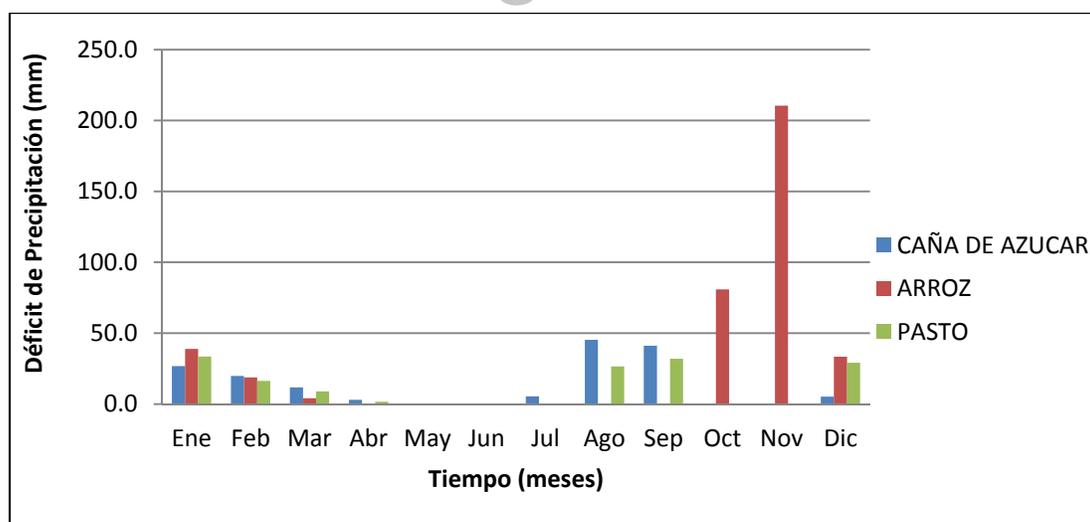


Figura 0.3. Déficit de precipitación por cultivo periodo 2021 - 2050. Fuente: elaboración propia

Tabla 0.5. Cuadro general de aprovisionamiento del sistema patrón de siembra bajo la tendencia actual.

Fuente: elaboración propia

Descripción/Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Déficit de Precipitación													
CAÑA DE AZUCAR	26.8	19.8	11.8	3	0	0	5.5	45.3	41.2	0	0	5.3	13.2
ARROZ	38.9	18.8	4.1	0	0	0	0	0	0	80.9	210.5	33.4	32.2
PASTO	33.5	16.4	9	1.7	0	0	0	26.6	32	0	0	29.1	12.4
Req. Netos sistema													
en mm/día	1.2	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	2.3	6.3	1.0	1.0
en mm/mes	37.8	18.8	4.9	0.3	0.0	0.0	0.4	4.2	3.9	72.8	189.5	31.1	30.3
en l/s/h	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	0.1	0.1
Área Irrigada (% del área total)	100	100	100	10	0	0	8	10	10	90	90	100	51.5
Req.de riego área real (m3/s)	1.7	1.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	1.9	1.8	3.6	9.8	1.5	1.8

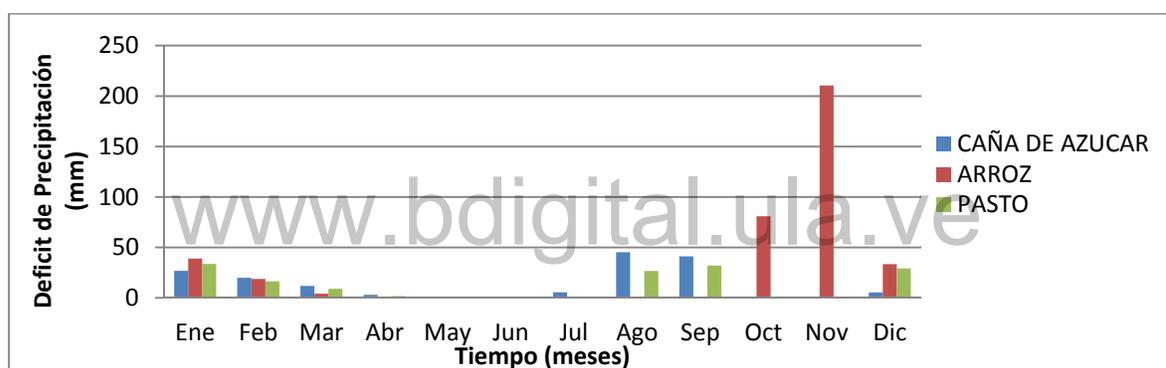


Figura 0.5. Déficit de precipitación por cultivo patrón de siembra bajo la tendencia actual. Fuente: elaboración propia

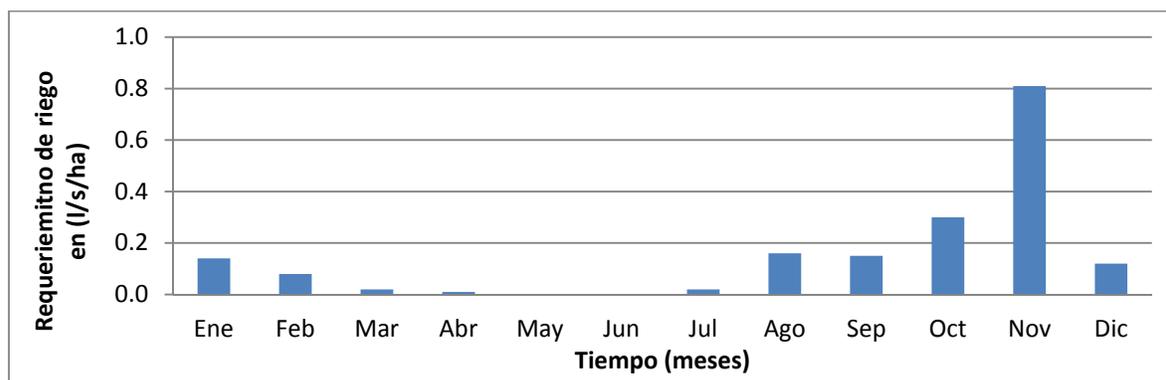


Figura 0.6. Requerimiento de riego del sistema patrón de siembra bajo la tendencia actual. Fuente: elaboración propia

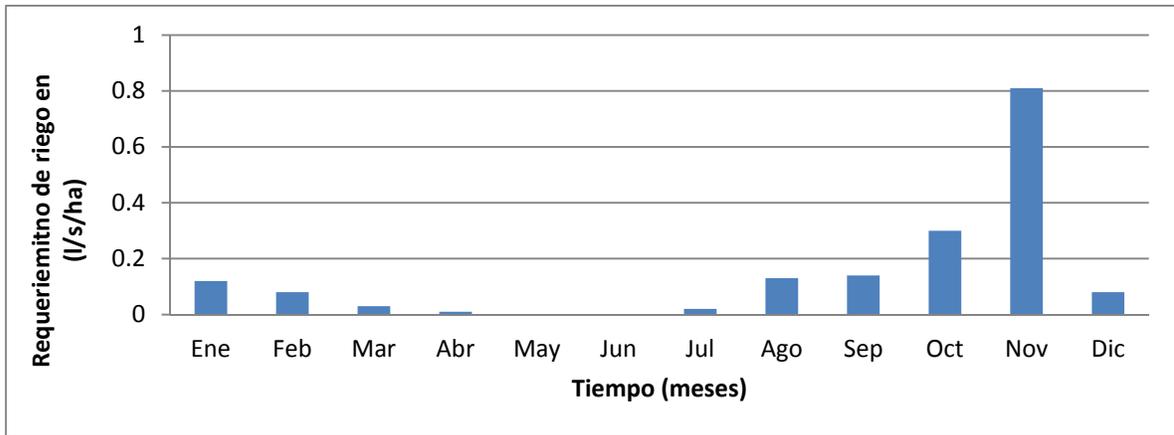


Figura 0.8. Requerimiento de riego del sistema patrón de siembra bajo la tendencia actual. Fuente: elaboración propia

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 9

ÁNÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar el análisis de los resultados obtenidos en el presente trabajo, fue necesario dividir el análisis en función de los objetivos desarrollados, tal como se presenta a continuación.

9.1. Diagnostico actual del sistema de riego Las Majaguas

Luego de la visita a campo y del análisis de la información encontrada en el sitio, se pudieron definir los siguientes resultados.

Garantizar la cantidad y calidad del agua que entra al sistema es indispensable para la producción, sin embargo en el sistema de riego Las Majaguas, las tomas de sus dos principales afluentes no se encuentran trabajando a cabalidad. Sobre este punto la toma del río Sarare se encuentra prácticamente desmantelada, sin mecanismos de control de caudal, análisis químico del agua, ni funcionamiento del desarenador, lo que hace casi imposible contar con un caudal controlado y de buena calidad dentro del sistema. Por otro lado la toma del río Cojedes se encuentra en mejor estado, pero de igual forma no cuenta con todas las compuertas para el control del caudal del río Cojedes, así como la falta de análisis químicos del agua que garanticen su calidad.

Las obras de conducción al embalse se encuentran en la mayor parte de su recorrido en buen estado, sin embargo la limpieza de los taludes es indispensable para mantener los caudales, siendo necesario realizarla con mayor regularidad.

El conjunto de obras que pertenecen al almacenamiento aún continúan realizando su trabajo, siendo necesario la reparación de algunas fugas y la recuperación de los pozos de alivio y piezómetros.

Con respecto a las estructuras de distribución se presentan grandes problemas, y es que la única manera de poder operar un sistema de riego es teniendo el control del agua que entra y sale del sistema. En nuestro caso la mayoría de las válvulas encargadas de controlar el agua dentro del sistema se encuentran inoperativas, principalmente por el robo de sus motores. Aunado a las pérdidas en las tomas del embalse que representan cerca del 10%, fugas en los canales por losas deterioradas y el mal uso del agua por parte de algunos productores, genera que el sistema trabaje por debajo de su eficiencia, entregando más agua de la requerida en algunos sectores, mientras que en otros no alcanza a entregar.

En líneas generales la falta de control del agua en el sistema es una de las causas que la eficiencia sea baja. Un ejemplo claro se observa al analizar la temporada de riego 2016–2017, en la cual se sembraron un total de 10.436 ha, distribuidas tal como se muestra en la Tabla 9.1, y se estimaron las necesidades hídricas del sistema con el software CROPWAT, tal como se muestra en la Tabla 9.2.

Tabla 0.1. Patrón de siembra temporada 2016–2017. Fuente: elaboración propia

Cultivo	Área Cultivada (ha)
Arroz	8042
Caña de Azúcar	1847
Pasto	547

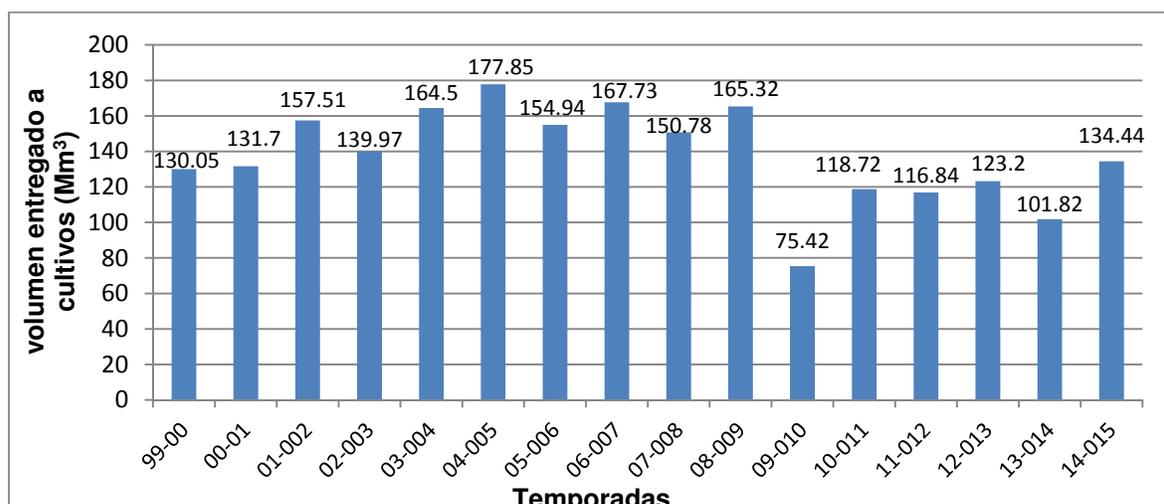


Figura 0.1. Volumen de agua entregado por temporadas de riego en el periodo 1999-2014 en el sistema de riego Las Majaguas. Fuente: elaboración propia

Al comparar la oferta con la demanda podemos observar que los ríos Cojedes y Sarare son capaces de garantizar la disponibilidad de agua requerida por el sistema de riego, teniendo un excedente de $6 \text{ m}^3/\text{seg}$ que representa el 68% de la demanda.

9.3. Análisis del cambio climático en la zona

De los 19 modelos del CMIP5 evaluados, se escogieron tres modelos, el MPI-ESM-LR desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología con sede en Hamburgo y más de 42 años de fundada, el HadGEM2-ES desarrollado por el Instituto de Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil y el GISS-E2-Rp1 desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) en su Instituto Goddard de Estudios Espaciales.

De los tres modelos seleccionados el MPI-ESM-LR fue el que mejor coeficiente de correlación obtuvo, alcanzando un valor de 0.74, por lo cual fue el utilizado para generar datos climáticos hasta el año 2020.

Sin embargo para la generación de datos climáticos en el periodo de 2021 al 2050, se utilizaron los tres modelos anteriormente mencionados y se analizaron los resultados obtenidos para cada uno observándose.

- Los tres modelos simulan una reducción del caudal en el río Cojedes en el periodo analizado (2021-2050), cada modelo con pendientes diferentes.
- El modelo HADGEM2-ES simula picos más altos que los otros dos modelos principalmente en los meses de junio y julio, sin embargo es el que refleja la mayor disminución de caudal de 69.27% al comparar el promedio del año 2021 con el del año 2050.
- El modelo MPI-ESM-LR, el cual es el que mejor representa los datos históricos, arroja una reducción de caudales de 65.31% al comparar el promedio del año 2021 con el del año 2050.

Tabla 0.3. Cuadro oferta - demanda del sistema de riego Las Majaguas para diferentes periodos.

Fuente: elaboración propia

Periodo	Oferta Q70 (m3/seg)			Área Regada (ha)	Demanda del Sistema Riego (m3/seg)	Diferencia entre la Oferta y la Demanda
	Río Cojedes	Río Sarare	Total			
1968 - 1982	12.26	4.21	16.47	11687.50	9.80	6.67
2008 - 2020	9.71	3.24	12.95	12100.00	12.70	0.25
2021 -2050	7.31	2.36	9.67	12100.00	8.50	1.17

Al revisar la tabla podemos visualizar que para el periodo 2008–2020 la oferta prácticamente es igual a la demanda, esto sin tomar en cuenta el caudal ecológico de ambos ríos.

De igual manera podemos observar que para el periodo 2021–2050 la oferta disminuye considerablemente, sin embargo la disminución de la evaporación simulada en ese periodo que provoca a su vez la disminución de la demanda, hace que la oferta aun sea mayor. Si por el contrario mantuviéramos la demanda estimada en el periodo 2008–2020 constante, podríamos tener un déficit en el sistema en el periodo 2021–2050 de $3.03\text{m}^3/\text{seg}$.

Esto nos deja claro que el área es seriamente afectada por el cambio climático, pudiendo presentar déficit en el periodo 2021–2050, ya que los caudales transportados por los ríos Cojedes y Sarare en conjunto para un Q70 presentan una disminución considerable y de no presentarse una disminución de la evaporación en ese periodo, la demanda pudiera ser significativamente mayor que la oferta.

9.4. Análisis de las demandas de riego

En función de los resultados obtenidos, se puede observar que la evaporación en el periodo 2006–2016 es mucho mayor que la arrojada por el Climate Explorer en el periodo 2021–2050, siendo los requerimientos de riego mayores en el periodo histórico que en el futuro, por lo que según los datos obtenidos, el cambio climático no aumentaría las demandas de riego sino que por el contrario las disminuiría.

Al analizar los rubros sembrados en el sistema de riego, se pudo observar que el requerimiento hídrico máximo aún bajo una disminución significativa de la precipitación, es de aproximadamente $8.50\text{m}^3/\text{seg}$ para el periodo 2021–2050, requerimiento mucho menor que el máximo estimado para el periodo 2006–2016 de $12.70\text{m}^3/\text{seg}$, debido a la disminución en los valores de evaporación simulados por el modelo climático.

En función a estos resultados podemos concluir que aunque las variables climáticas de precipitación y evaporación sean afectadas por efecto del cambio climático, al realizar la comparación de los tres patrones de riego analizados las variaciones en la demanda son muy pequeñas para tomarlas en cuenta, pudiendo utilizar cualquier patrón de cultivo, sin que surjan problemas de suministro para suplir las demandas.

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1. Conclusiones

En la actualidad afirmar que existe un cambio en el clima y que este a su vez se ha originado como consecuencia de actividades humanas, es uno de los debates científicos con mayor controversia en la actualidad. El concepto de variabilidad climática es una opción ante el cambio climático. Quienes favorecen la idea de la variación climática se apoyan en la idea de que el aumento de la temperatura media mundial es debido a un proceso estacional de varios miles de años de los cuales no se tiene registros. Sin embargo los últimos estudios realizados por distintas instituciones a nivel mundial, reflejan datos de dióxido de carbono en el aire nunca antes medidos, cuyo incremento ha sido exponencial durante los últimos años y cuyo origen es netamente por actividades humanas, generando procesos muy complicados que a la final se ven reflejados en un incremento de la temperatura media mundial, la disminución de las capas de hielo terrestre y del hielo ártico marino y un aumento en el nivel del mar.

La primera conclusión que podemos extraer de este trabajo, es que partiendo de la premisa que el cambio climático es real, es necesario concientizarnos como seres humanos que podemos estar ante un hecho que de no tomar las medidas necesarias para su mitigación, afecte considerablemente la vida tal como la conocemos. Es por ello que es necesario que como planificadores, incluyamos los posibles efectos del cambio climático en cada uno de los proyectos que formulemos, evitando caer en proyecciones subestimadas que puedan generar daños irreparables.

Al analizar la variación en la disponibilidad de agua del sistema de riego Las Majaguas, objetivo principal del presente trabajo, podemos concluir que la misma se ve afectada por diferentes causas, en las que destacan las malas condiciones físicas en las que se encuentra el sistema, el efecto del cambio climático en la zona, y la variación en las demandas de agua dentro del sistema.

Durante el análisis de cada una de las posibles causas que ocasionan una disminución en la disponibilidad de agua del sistema, se generaron metodologías para el análisis del cambio climático en nuestro país, las cuales se consideran productos importantes en el presente trabajo y por ende se detallan a continuación.

Uno de estos productos lo constituye la selección de los modelos climáticos a utilizar en el análisis de un determinado proyecto. Y es que la metodología más empleada en nuestro país consiste en utilizar los modelos obtenidos de las comunicaciones de cambio climático desarrolladas por los entes gubernamentales. Sin embargo esta metodología no nos garantiza seleccionar los modelos que mejor se adapten a nuestra zona de estudio, ya que los modelos climáticos utilizados en todo el país no siempre arrojan las mejores correlaciones para una zona en particular. Es por ello que dentro del presente trabajo se desarrolló una metodología adaptada a países en desarrollo, en la que la selección de los modelos climáticos, se realiza mediante una comparación de los modelos aprobados por el IPCC con datos históricos medidos mediante un coeficiente de correlación, pudiendo seleccionar aquellos modelos con mejores coeficientes de correlación y cuya tendencia de los datos sea la misma que la de los datos medidos.

Otro de los productos generados en el presente trabajo es la metodología utilizada para la reducción de escala, y aunque existe una variedad de técnicas para realizar este proceso, se considera que el

de los mecanismos de apertura de las compuertas del aliviadero, ya que aunque el control del embalse se realiza por las tomas, es necesario contar con el aliviadero en caso de una emergencia.

Instalar las válvulas del sistema de riego en cada una de las tomas de los canales M5 y M7, así como el control de las filtraciones en las tomas del embalse. En lo referente a la operación del sistema de riego, es necesario crear nuevas reglas de operación del embalse en mutuo acuerdo entre el MINEA y la Empresa Socialista del Sistema de Riego Las Majaguas, de manera de incluir los efectos del cambio climático en la zona, utilizando los caudales generados por los modelos climáticos en el periodo 2021 – 2050, pudiendo prever épocas de sequías que afecten considerablemente la producción del sistema. Se recomienda que estas reglas de operación sean evaluadas al final de cada temporada de riego y de ser necesario modificarlas en función de los cambios percibidos.

Analizar la posibilidad de realizar cambios en los patrones de riego y en los rubros a sembrar en el sistema, utilizando cultivos con mayor resistencia a los cambios del clima y modificar los patrones en cada temporada en función de los cambios observados.

En relación al manejo del sistema se recomienda optimizar el uso del agua, garantizando la cantidad necesaria para cada cultivo y controlando su uso por parte de los productores. Este control puede ser implementado dándole un precio justo al agua, de manera que el sistema sea autosustentable sin necesidad de depender de subsidios gubernamentales, con excepciones de reparaciones muy costosas en las que sea necesario un financiamiento por parte del gobierno nacional.

El mantenimiento de las instalaciones debe ser constante por parte del organismo encargado, siendo necesario contar con los instrumentos necesarios para cumplir con su labor como los son vehículos, técnicos capacitados, adiestramiento y asesoramiento a los productores, charlas acerca de nuevas tecnologías de riego, seguridad física y jurídica, garantizar el mercado para los cultivos sembrados, ser intermediario en el financiamiento por parte de las entidades bancarias a los productores y velar por el uso de dichos recursos dentro del sistema.

El sistema de riego Las Majaguas al igual que la mayoría de los sistemas de riego del país, se han visto afectados por la falta de mantenimiento de sus instalaciones y aun así muchos se han mantenido en el tiempo, aun disminuyendo considerablemente su producción. Es importante que tanto los productores como los entes encargados de su manejo sientan al sistema como suyo, tomando las previsiones necesarias para que el mismo se mantenga en funcionamiento con el paso del tiempo, ya que estos sistemas representan la seguridad alimentaria del país.

CAPÍTULO 11

BIBLIOGRAFÍA

- Altuve, R., Casas M., Chacón R. (1991). Diagnostico General de la Situación Actual de los Sistemas de Riego en Venezuela. Universidad del Zulia, Maracaibo.
- Aparicio, F. (2010). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa-Norieda Editores, México.
- Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela (2016). Primer Informe Problemática del Agua en Venezuela. Caracas.
- Baldayo, I. y Bolívar (2001). Descripción y diagnóstico del sistema de riego Las Majaguas. CIDIAT ULA. Mérida.
- Bergström, S. (1992). The HBV Model its structure and applications. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Norrköping.
- Beven and Kirkby (1979), TOPMODEL User's Manual. Department of Environmental Sciences Lancaster University. Lancaster.
- CIDIAT (1993). Mantenimiento del vaso del embalse Las Majaguas con apoyo batimétrico, Municipio autónomo San Rafael de Onoto y Agua Blanca, Sistema de Riego Las Majaguas, CIDIAT ULA Mérida.
- Comisión Nacional del Desarrollo Integral del Sistema de Riego Cojedes-Sarare, Las Majaguas (1987). Proposición del plan de acción para el sistema de riego Cojedes-Sarare, Las Majaguas, Edo. Portuguesa. Ministerio de Obras Públicas, Caracas.
- Comité coordinador del Sistema de Riego Cojedes – Sarare, región de las Majaguas (1965). El Plan de las Majaguas. Ministerio de Obras Públicas, Caracas.
- Compañía de Ingeniería para Estudios y Proyectos en Aguas y Ambiente (2014). Estudio de Hidrología e Hidráulica, Gasoducto Eje Norte Llanero Fase I. PDVSA GAS, Barinas.
- Consejo Nacional de Riego y Saneamiento de Tierras (1997). Política y Plan Nacional de Riego y Saneamiento de Tierras. El Consejo, Caracas.
- Constitución Bolivariana de la República de Venezuela. (1999). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 5453, marzo 3, 2000.
- Decreto N° 6.389 (Decreto para la conformación de la Empresa Socialista de Riego las Majaguas, S.A.). (2008, Septiembre 02). Gaceta Oficial de la República de Venezuela 39.010, Septiembre 05, 2008.
- Decreto N° 539 (Decreto que establece la actividad del Sistema de Riego Las Majaguas). (1959, Enero 14). Gaceta Oficial de la República de Venezuela 25.865, Enero 17, 1959.
- DHI Water and Environment (1980). MIKE SHE User's Manual. Systeme Hydrologique Européen. Hørsholm.

- Hydrologic Engineering Center (2008), Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). US Army Corps of Engineers, David, CA.
- Instituto Nacional de Desarrollo Rural (2015). Plan Nacional de Agricultura de Riego y Saneamiento de Tierras (2015-2019). INDER, Portuguesa.
- Instituto Nacional de Desarrollo Rural (2017). Estudio para la optimización del aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales y/o subterráneos en los sistemas de riego: río Guárico, Tiznado, Las Majaguas, río Boconó, río Guanare, valle de Quibor, Abreu E´lima y el Cenizo. INDER, Portuguesa.
- Instituto Nacional de Obras Sanitarias (1983). Abastecimiento de agua a Barquisimeto y Poblaciones Vecinas, serie Agua en el medio Urbano. INOS, Caracas.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (2019). Climate Explorer European Climate Assessment & Data. KNMI, Utrecht. Disponible: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi> [Consulta 2019, enero 14].
- Guerra L. G. (1981). Disponibilidad de agua superficial en la subregión Portuguesa. CIDIAT ULA, Mérida.
- Marteló, M. Pérez, M. (2010). Estudio del Impacto del Cambio Climático sobre la Agricultura y la Seguridad Alimentaria en la República Bolivariana de Venezuela. FAO, Caracas.
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas (s.f). Observaciones sobre la ejecución del plan de desarrollo integral de Las Majaguas (primera etapa del sistema de riego Cojedes-Sarare). MOP, Caracas.
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Recursos Hidráulicos (s.f). Sistema de Riego Cojedes-Sarare (Las Majaguas). MOP, Caracas.
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (2005). Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela. MARN, Caracas.
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (1983). Sistemas Ambientales Venezolanos, Región Natural 13. MARN, Caracas.
- Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas (2017). Segunda Comunicación Nacional Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático. MPPEA, Caracas.
- Naciones Unidas (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. CMNUCC, NY.
- Naciones Unidas (1995). Primera Conferencia de Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. UN, Berlín.
- Naciones Unidas (1998). Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. UN, Kyoto.
- Olmedo Ingeniería C.A. (2009). Estudio para la Consolidación del Sistema de Riego Las Majaguas. OLMECA, Portuguesa.
- Quiroz, O. (2007). Estado Yaracuy. Geo-Venezuela, Tomo 7, Capítulo 58. Fundación Empresas Polar, Caracas.