

**USO RACIONAL DEL RECURSO AGUA SUBTERRÁNEA CON FINES DE RIEGO, ENTRE
LOS RÍOS GUACHE Y SARARE DEL ESTADO PORTUGUESA, CONSIDERANDO
CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Por:

Magally Andreina Romero Mejias

www.bdigital.ula.ve

Trabajo para optar al grado de Magister Scientiae en Desarrollo de los Recursos Aguas y
Tierras, Mención: Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN
AMBIENTAL Y TERRITORIAL (CIDIAT)
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MÉRIDA, VENEZUELA
ENERO, 2023

Reconocimiento

**USO RACIONAL DEL RECURSO AGUA SUBTERRÁNEA CON FINES DE RIEGO, ENTRE
LOS RÍOS GUACHE Y SARARE DEL ESTADO PORTUGUESA, CONSIDERANDO
CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Por:

Magally Andreina Romero Mejias

C.I.: V-19.751.126

Trabajo para optar al grado de Magister Scientiae en Desarrollo de los Recursos Aguas y
Tierras, Mención: Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos

www.bdigital.ula.ve

Dr. Hervé J. Jégat N.

Tutor

Dr. José G. Gutiérrez Ch.

Co-tutor

Dr. Luis E. Mora M.

Asesor

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN
AMBIENTAL Y TERRITORIAL (CIDIAT)
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MÉRIDA, VENEZUELA
ENERO, 2023

Reconocimiento

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xix
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xxiii
LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES.....	xxv
Resumen.....	xxvii
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Importancia y justificación del estudio.....	4
1.5. Alcance.....	6
1.6. Limitaciones.....	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes de la investigación.....	7
2.2. Bases teóricas.....	10
2.2.1. Agua subterránea.....	10
2.2.1.1. Origen del agua subterránea.....	10
2.2.1.2. Parámetros hidrogeológicos fundamentales.....	12
2.2.1.3. Síntesis de la gestión de las aguas subterráneas en Venezuela.....	14
2.2.1.4. Políticas de desarrollo de las aguas subterráneas en Venezuela.....	15
2.2.1.5. Modelo conceptual de un sistema hidrogeológico.....	15
2.2.2. Modelos de simulación hidrológica y cambio climático.....	16
2.2.2.1. Simulación hidrológica.....	16

2.2.2.1.1. Modelo de simulación hidrológica a nivel mensual, SIHIM.....	17
2.2.2.2. Cambio climático.....	28
2.2.2.2.1. Escenarios de emisiones de cambio climático	31
2.2.2.2.2. Modelos climáticos globales.....	33
2.2.2.2.3. Escenarios de cambio climático regionales y locales a partir de los modelos globales.....	34
2.2.2.2.4. Investigaciones sobre el cambio climático en Venezuela	35
2.2.2.2.5. Visión histórica del cambio climático a nivel mundial.....	35
2.2.3. Escasez del recurso agua, el papel de la agricultura y cambio climático.....	38
2.2.3.1. Requerimientos hídricos de un cultivo	40
2.3. Definición de términos.....	42
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	47
3.1. Tipo de investigación.....	47
3.2. Descripción de la zona de estudio.....	47
3.2.1. Ubicación del área de estudio.....	47
3.2.2. Caracterización físico-natural.....	49
3.2.2.1. Vegetación	49
3.2.2.2. Clima.....	49
3.2.2.3. Relieve	51
3.2.2.4. Hidrografía	52
3.2.2.5. Geología.....	54
3.2.2.6. Suelos	57
3.2.2.7. Recursos protegidos.....	57
3.2.3. Caracterización socio-económica	58
3.2.3.1. Aspectos históricos.....	58
3.2.3.2. Población	58

3.2.3.3. Educación	60
3.2.3.4. Actividades económicas	61
3.2.3.5. Potencial agrícola y capacidad de uso de las tierras	63
3.2.3.6. Vialidad y transporte.....	64
3.3. Técnicas, procesamiento y análisis de datos.....	64
3.3.1. Recopilación de información bibliográfica y cartográfica	65
3.3.2. Procesamiento de la información	67
3.3.3. Interpretación de los datos.....	70
CAPÍTULO 4. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NATURAL Y ANÁLISIS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	71
4.1. Recopilación de la información hidroclimática básica para la(s) cuenca(s) involucrada(s).....	71
4.1.1. Descripción de la cuenca hidrográfica del río Acarigua	71
4.2. Análisis y procesamiento de la información hidroclimática recopilada	72
4.2.1. Selección de las estaciones medidoras de precipitación.....	72
4.2.2. Ubicación y selección de las estaciones hidrométricas	82
4.2.3. Estimación de los registros faltantes	82
4.2.4. Selección de los períodos de registro histórico para efectuar la calibración y simulación del modelo	84
4.2.5. Determinación de la precipitación media de la cuenca.....	84
4.2.6. Selección de los datos de evaporación y determinación de la evaporación media.....	85
4.3. Simulación hidrológica a nivel mensual	88
4.3.1. Calibración del modelo.....	88
4.3.1.1. Entradas del modelo y estimación inicial de los parámetros	89
4.3.1.2. Valores finales de los parámetros y salidas del modelo.....	90

4.3.2. Simulación de la recarga natural del acuífero	91
4.3.3. Análisis de la variación de la recarga natural considerando condiciones de cambio climático	92
4.3.3.1. Reducción de la escala a partir de datos históricos	101
4.3.3.2. Reducción de la escala a partir de datos futuros	102
4.3.3.3. Estimación de la recarga natural considerando condiciones de cambio climático	105
CAPÍTULO 5. ESTIMACIÓN DE LAS RESERVAS DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	107
5.1. Elaboración del mapa piezométrico.....	107
5.2. Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero.....	111
5.2.1. Elaboración de los perfiles litológicos.....	111
5.2.2. Elaboración de las secciones litológicas	112
5.2.3. Elaboración de mapas de contorno y superficies en 3D.....	116
5.3. Estimación de las reservas de agua subterránea en el acuífero.....	119
CAPÍTULO 6. ESTIMACIÓN DE LAS DEMANDAS DE RIEGO	123
6.1. Estimación básica de las necesidades de agua de los cultivos	123
6.1.1. Demanda de riego para la condición histórica.....	125
6.1.2. Demanda de riego para la condición actual	125
6.2. Estimación de las necesidades de agua de los cultivos, considerando condiciones de cambio climático.....	130
6.2.1. Requerimientos de riego para los años 2060 y 2080 bajo un escenario intermedio (RCP 4.5).....	130
6.2.2. Requerimientos de riego para los años 2060 y 2080 bajo un escenario más desfavorable (RCP 8.5)	130
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	139
7.1. Análisis de la estimación de la recarga natural del acuífero.....	139

7.2. Análisis de las reservas de agua subterránea estimadas mediante el modelo hidrogeológico conceptual.....	141
7.3. Análisis de la estimación de las demandas de riego.....	142
7.4. Uso racional del agua subterránea con fines de riego en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare.....	144
7.4.1. Estrategias para el uso racional del agua subterránea con fines de riego en el área de estudio.....	150
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	153
8.1. Conclusiones.....	153
8.2. Recomendaciones.....	155
REFERENCIAS CITADAS	157
APÉNDICES.....	163
A. Perfiles litológicos	164
B. Secciones litológicas.....	170
C. Error de calibración del modelo SIHIM	173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 2.1. Modelos climáticos utilizados en el Quinto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	30
Tabla 3.1. Coordenadas del área de estudio	48
Tabla 3.2. Tendencia de la población y la densidad del estado Portuguesa	59
Tabla 4.1. Estaciones hidroclimáticas encontradas en las cercanías del área de estudio	74
Tabla 4.2. Estaciones seleccionadas para la cuenca del río Acarigua	80
Tabla 4.3. Años de registro disponibles (período 1960-2000) de las estaciones de precipitación seleccionadas	81
Tabla 4.4. Estación hidrométrica considerada.....	82
Tabla 4.5. Completación de datos en las estaciones seleccionadas para la calibración y simulación de la cuenca del río Acarigua.....	83
Tabla 4.6. Precipitación media por Thiessen e isoyetas en la fase de calibración del modelo.....	85
Tabla 4.7. Estación de evaporación seleccionada	87
Tabla 4.8. Áreas de influencia con respecto a la cuenca del río Acarigua de las distintas estaciones	89
Tabla 4.9. Parámetros de entrada al modelo SIHIM.....	89
Tabla 4.10. Valores finales de los parámetros del modelo en la fase de calibración para la cuenca del río Acarigua	90
Tabla 4.11. Coeficiente de correlación entre el promedio de los datos medidos y los datos históricos de los modelos climáticos	93
Tabla 4.12. Comparación de los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo seleccionado (RCP 4.5 - Año 2050)	96
Tabla 4.13. Comparación de los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo seleccionado (RCP 4.5 - Año 2070)	97

Tabla 4.14. Comparación de los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo seleccionado (RCP 8.5 - Año 2050)	98
Tabla 4.15. Comparación de los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo seleccionado (RCP 8.5 - Año 2070)	99
Tabla 4.16. Factores multiplicadores para el período 1998-2022 del modelo CNRM-CM5..	102
Tabla 4.17. Factores multiplicadores para el período 2023-2060 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5	103
Tabla 4.18. Factores multiplicadores para el período 2023-2060 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5	103
Tabla 4.19. Factores multiplicadores para el período 2061-2080 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5	104
Tabla 4.20. Factores multiplicadores para el período 2061-2080 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5	105
Tabla 5.1. Cota piezométrica para cada pozo.....	107
Tabla 5.2. Litologías para la creación del perfil N° 1.....	111
Tabla 5.3. Litologías usadas para elaborar la sección 1.....	114
Tabla 5.4. Coordenadas UTM y profundidades para la sección 1	115
Tabla 5.5. Cotas de las Bases de cada litología del modelo hidrogeológico	116
Tabla 5.6. Espesores acumulados de cada litología	116
Tabla 5.7. Porosidades totales y eficaces de diversos materiales.....	120
Tabla 5.8. Valor total de las reservas de agua en el acuífero.....	121
Tabla 6.1. Porcentajes de área sembrada según el patrón de siembra histórico.....	125
Tabla 6.2. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2009.....	126
Tabla 6.3. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2022.....	128
Tabla 6.4. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2060 (RCP 4.5)	131
Tabla 6.5. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2080 (RCP 4.5)	133
Tabla 6.6. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2060 (RCP 8.5)	135

Tabla 6.7. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2080 (RCP 8.5)	137
Tabla 7.1. Períodos simulados para la estimación de la recarga natural.....	139
Tabla 7.2. Comparación de la recarga estimada, las reservas permanentes permeables y los requerimientos de riego en el área de estudio	142
Tabla 7.3. Valores promedio de las superficies máximas regables con base a la recarga estimada	144
Tabla C.1. Datos utilizados para la determinación del error en la calibración del modelo SIHIM	174
Tabla C.2. Resumen del error obtenido en la fase de calibración del modelo SIHIM	178
Tabla C.3. Diferencia porcentual de la recarga entre los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 ...	179

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 2.1. Representación del ciclo hidrológico.	11
Figura 2.2. Conceptualización del Sistema Hidrológico Regional usado en el Modelo.	19
Figura 2.3. Estructura conceptual de un modelo de circulación general de la atmósfera.	32
Figura 2.4. Balance de agua en el suelo en la zona radicular.	41
Figura 3.1. Ubicación del área de estudio.	48
Figura 3.2. Distribución de isotermas anuales (°C) en el estado Portuguesa.	50
Figura 3.3. Distribución de isoyetas anuales (mm) en el estado Portuguesa.	51
Figura 3.4. Población total censada del estado Portuguesa. Censos 1873-2011.	60
Figura 3.5. Esquema metodológico.	66
Figura 3.6. Pasos para la estimación de la recarga natural del acuífero.	67
Figura 3.7. Pasos para la estimación de las reservas de agua subterránea en el acuífero. ..	68
Figura 3.8. Pasos para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.	69
Figura 4.1. Estaciones meteorológicas ubicadas tanto dentro como en las cercanías de la cuenca del río Acarigua.	73
Figura 4.2. Polígonos de Thiessen para las estaciones de precipitación en la cuenca del río Acarigua.	79
Figura 4.3. Mapa de isoyetas en la cuenca del río Acarigua.	85
Figura 4.4. Evaporación media anual para la estación seleccionada.	86
Figura 4.5. Valores medidos vs. valores históricos de precipitación del modelo CNRM-CM5.	95
Figura 4.6. Gráfico de comparación entre los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo CNRM-CM5 (RCP 4.5 - Año 2050).	97
Figura 4.7. Gráfico de comparación entre los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo CNRM-CM5 (RCP 4.5 - Año 2070).	98

Figura 4.8. Gráfico de comparación entre los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo CNRM-CM5 (RCP 8.5 - Año 2050).....	99
Figura 4.9. Gráfico de comparación entre los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo CNRM-CM5 (RCP 8.5 - Año 2070).....	100
Figura 5.1. Mapa piezométrico del área de estudio.....	110
Figura 5.2. Perfil litológico N° 1.....	112
Figura 5.3. Ubicación de las secciones litológicas en el área de estudio.....	113
Figura 5.4. Sección litológica N° 1.	115
Figura 5.5. Modelo hidrogeológico conceptual obtenido.	118
Figura 6.1. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2009.	127
Figura 6.2. Requerimiento de riego del sistema para el año 2009.....	127
Figura 6.3. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2022.	129
Figura 6.4. Requerimiento de riego del sistema para el año 2022.....	129
Figura 6.5. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2060 (RCP 4.5).....	132
Figura 6.6. Requerimiento de riego del sistema para el año 2060 (RCP 4.5).....	132
Figura 6.7. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2080 (RCP 4.5).....	134
Figura 6.8. Requerimiento de riego del sistema para el año 2080 (RCP 4.5).....	134
Figura 6.9. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2060 (RCP 8.5).....	136
Figura 6.10. Requerimiento de riego del sistema para el año 2060 (RCP 8.5).....	136
Figura 6.11. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2080 (RCP 8.5).....	138
Figura 6.12. Requerimiento de riego del sistema para el año 2080 (RCP 8.5).....	138
Figura 7.1. Lámina de recarga anual estimada para el período histórico 1998-2022 y los períodos futuros 2023-2060 y 2061-2080.	141
Figura 7.2. Contraste de la recarga estimada y los requerimientos de riego para cada escenario planteado.....	143
Figura A.1. Perfil litológico N° 2.	165

Figura A.2. Perfil litológico N° 3.	166
Figura A.3. Perfil litológico N° 4.	167
Figura A.4. Perfil litológico N° 5.	168
Figura A.5. Perfil litológico N° 6.	169
Figura B.1. Sección litológica N° 2.	171
Figura B.2. Sección litológica N° 3.	172

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Pág.
Ec. 2.1 Porosidad.....	12
Ec. 2.2 Permeabilidad o conductividad hidráulica	12
Ec. 2.3 Transmisividad.....	13
Ec. 2.4 Precipitación media ajustada	18
Ec. 2.5 Factor de ajuste de la precipitación media	18
Ec. 2.6 Evaporación media ajustada.....	20
Ec. 2.7 Factor de ajuste de la evaporación media.....	20
Ec. 2.8 Evapotranspiración real	20
Ec. 2.9 Evapotranspiración potencial.....	21
Ec. 2.10 Contenido límite de la humedad.....	21
Ec. 2.11 Infiltración potencial	21
Ec. 2.12 Infiltración real en el mes	22
Ec. 2.13 Humedad disponible para infiltrar.....	22
Ec. 2.14 Humedad inicial en el almacenamiento superficial	22
Ec. 2.15 Percolación durante el mes.....	22
Ec. 2.16 Relación de humedad del suelo	22
Ec. 2.17 Factor para ajustar FPER y REL.....	23
Ec. 2.18 Fracción de la infiltración real que percola en el mes.....	23
Ec. 2.19 Almacenamiento superficial en el mes	23
Ec. 2.20 Almacenamiento superficial final.....	23
Ec. 2.21 Humedad final del suelo para el mes	24
Ec. 2.22 Humedad del suelo en el mes.....	24

Ec. 2.23 Fracción de la infiltración que no percola	24
Ec. 2.24 Almacenamiento final del agua subterránea	24
Ec. 2.25 Almacenamiento promedio del agua subterránea	25
Ec. 2.26 Escurrimiento durante el mes.....	25
Ec. 2.27 Escurrimiento retardado.....	25
Ec. 2.28 Caudal base.....	26
Ec. 2.29 Flujo subterráneo efluente en el mes	26
Ec. 2.30 Relación entre PQB y PFSE	26
Ec. 2.31 Escorrentía total en el mes.....	27
Ec. 2.32 Escorrentía del mes	27
Ec. 2.33 Escorrentía retardada del mes	27
Ec. 4.1 Fórmula de Langbein	82
Ec. 5.1 Nivel piezométrico.....	107
Ec. 5.2 Volumen de reservas	119
Ec. 6.1 Ecuación de Holdridge.....	124

LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES

AASI	Almacenamiento de agua subterránea inicial
AINFP	Infiltración potencial
AINFRE	Infiltración real
ASUP	Almacenamiento superficial disponible
ASUPF	Almacenamiento superficial final
CLE	Contenido límite de humedad en el suelo
CINF	Capacidad de infiltración
CT	Factor para convertir evaporación media en evapotranspiración potencial
EMI	Evaporación media calculada por Isopleas
EMT	Evaporación media calculada por Thiessen
ETP	Evapotranspiración potencial
ETR	Evapotranspiración real
ESCD	Escurrimiento
ESC0RR ⁽ⁱ⁾	Fracción de ESCOTA y ESCORT ⁽ⁱ⁻¹⁾ que sale como escorrentía del mes
ESCORT ⁽ⁱ⁻¹⁾	Escorrentía retardada que sale en el siguiente mes.
ESCORT	Escorrentía retardada del mes anterior
ESCOTA	Escorrentía afluyente
ESCT	Escorrentía total del mes a la salida del área de drenaje
ESCURT ⁽ⁱ⁾	Escurrimiento retardada que sale en el siguiente mes
ESCURT ⁽ⁱ⁻¹⁾	Escurrimiento retardado del mes anterior
ESCUA	Escurrimiento afluyente
EV _j	Evaporación puntual de tina medida en la estación j
EVM	Evaporación media espacial
FPER	Fracción de la infiltración real que percola
FSUBA	Flujo subterráneo afluyente
FSUBE	Flujo subterráneo efluente
HDI	Humedad disponible para infiltrar
HIS	Humedad inicial en el suelo

HSF	Humedad del final del suelo
HSM	Humedad del suelo promedio durante un mes
HSN	Almacenamiento nominal de la humedad del suelo
NEPRE	Número de estaciones de precipitación
NEVAP	Número de estaciones de evaporación
PERC	Percolación total durante el mes
PESC	Fracción del almacenamiento superficial que sale como escurrimiento
PFSE	Fracción del almacenamiento del agua subterránea que sale como flujo subterráneo efluente.
PMI	Precipitación media calculada por Isoyetas
PMT	Precipitación media calculada por Thiessen
PORCEj	Fracción porcentual del área de drenaje dominada por la estación de evaporación j.
PORCPj	Fracción porcentual del área de drenaje dominada por la estación de precipitación j.
PPj	Precipitación puntual medida en la estación j
PRE	Precipitación media espacial
PQB	Fracción del almacenamiento del agua subterránea que sale como caudal base
QB	Caudal base durante el mes
REL	Relación entre la humedad del suelo y su capacidad nominal
VF	Almacenamiento final del agua subterránea
VM	Almacenamiento del agua subterránea promedio durante el mes

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y
TERRITORIAL (CIDIAT)

USO RACIONAL DEL RECURSO AGUA SUBTERRÁNEA CON FINES DE RIEGO,
ENTRE LOS RÍOS GUACHE Y SARARE DEL ESTADO PORTUGUESA, CONSIDERANDO
CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Autor: Magally Andreina Romero Mejias

Tutor: Dr. Hervé Jégat

Co-tutor: Dr. José Gregorio Gutiérrez

Asesor: Dr. Luis Mora

Fecha: Enero, 2023

www.bdigital.ula.ve
Resumen

El estado Portuguesa representa una valiosa fuente de agua subterránea usada para riego. Sin embargo, la extracción del recurso sin tomar en cuenta la tasa de recarga natural de los acuíferos existentes en la zona, los requerimientos de agua de los cultivos y la posible influencia del cambio climático, podría disminuir las reservas permanentes del recurso. De allí que, este estudio tenga como objetivo proponer estrategias para el uso racional del agua subterránea con fines de riego, en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa, considerando condiciones de cambio climático. Para ello, en primer lugar, se recopiló información hidroclimática e información referente a los cultivos de la zona; luego, se estimó la recarga natural del acuífero usando un modelo hidrológico a escala mensual, se estimaron las reservas permanentes de agua subterránea mediante un modelo hidrogeológico conceptual y se determinaron los requerimientos hídricos de cultivos representativos del área utilizando un modelo de simulación agroclimático; por último, se realizó el contraste de dichos requerimientos con la disponibilidad del agua subterránea, tomando en cuenta las condiciones de cambio climático incorporadas en ambos casos. El modelo climático seleccionado en esta investigación fue el CNRM-CM5; a cuyos datos se les aplicó un proceso de reducción de escala. Los resultados mostraron que la demanda de agua por parte de los cultivos analizados es significativamente mayor que la recarga natural estimada, en prácticamente todos los períodos simulados. Finalmente, se propusieron estrategias para un uso racional del agua subterránea en el acuífero estudiado.

Descriptores: *acuífero; simulación hidrológica; cambio climático; río Guache; río Sarare.*

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

El agua dulce ha sido uno de los recursos naturales más derrochados a pesar de su importancia en la vida sobre la tierra. Son muchas las presiones que se ejercen sobre tal recurso, como el cambio de uso del suelo y la industrialización. A la lista se suman el efecto del cambio climático global y la variabilidad climática, cuyo escenario actual muestra serios efectos en los ecosistemas de agua dulce y, por ende, en la disponibilidad para consumo humano. Cárdenas y Cárdenas (2009).

Los Llanos venezolanos, por su extraordinaria abundancia de recursos hídricos y edáficos, enclavados en el centro del país, son la mejor garantía para el progreso sostenido de Venezuela. La ocupación y aprovechamiento de las tierras llaneras, de manera racional y sostenible, debe ser prioritario en los planes nacionales de desarrollo. López *et al.* (2015).

Según Foster y Shah (2012), hoy en día existe una relación directa entre el uso del agua subterránea y la producción de alimentos. En efecto, la agricultura de regadío es actualmente uno de los mayores extractores y consumidores de agua subterránea del mundo, en donde casi el 40% de toda la tierra cultivada se riega con agua extraída de pozos. Asimismo, las prácticas de cultivo ejercen una gran influencia sobre la recarga y calidad del agua subterránea.

Además, la población mundial en aumento requiere cada vez más una mayor cantidad de alimentos, por lo que ejerce una fuerte presión sobre la producción de los mismos y sobre los recursos naturales, especialmente sobre el agua; la cual es escasa en algunas regiones forzando a la población a buscar fuentes de agua alternativas a las fuentes superficiales para satisfacer sus necesidades. Tal es el caso de los llanos Occidentales de Venezuela, donde gran parte de los cultivos existentes en la zona son regados con agua subterránea. Sin embargo, el uso extensivo de este recurso podría causar un serio agotamiento de los acuíferos de la zona y degradación ambiental.

Por otro lado, el desafío que implica la adaptación al cambio climático puede comenzar a abordarse a través de una serie de cambios fundamentales en el modo en el que las sociedades administran y desarrollan sus recursos hídricos. Sadoff y Muller (2010).

En tal sentido, el presente estudio tiene como finalidad proponer estrategias para el uso racional del agua subterránea con fines de riego, en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa, considerando condiciones de cambio climático.

El trabajo se estructura en ocho capítulos. En el Capítulo 1 se presenta el planteamiento del problema, la justificación e importancia de la investigación, el objetivo general y los objetivos específicos, así como el alcance y las limitaciones de la investigación. En el Capítulo 2 se desarrolla el marco conceptual que sustenta la investigación, así como los antecedentes o trabajos previos relacionados con la temática de estudio. En el Capítulo 3 se presenta la descripción del área de estudio y la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo. El Capítulo 4 muestra la estimación de la recarga natural del acuífero, partiendo de datos históricos de precipitación y evaporación, utilizando un modelo hidrológico paramétrico a escala mensual, para luego realizar el análisis de la variación de dicha recarga considerando condiciones de cambio climático. El capítulo 5 describe las actividades realizadas para poder estimar las reservas de agua subterránea con fines potenciales de riego en el área de estudio, entre dichas actividades se incluye la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero estudiado. En el capítulo 6 se determinó el requerimiento de agua de cultivos representativos del área de estudio para el período histórico, actual y futuro, considerando condiciones de cambio climático. En el capítulo 7 se desarrolla de manera organizada los resultados, así como su análisis e interpretación en función del cumplimiento de los objetivos planteados. Finalmente, en el Capítulo 8 se establecen las ideas definitivas del trabajo a partir del análisis de los resultados obtenidos; y se plantean las sugerencias que sobre el estudio se consideran necesarias a posteriori de este trabajo de investigación.

1.2. Planteamiento del problema

La disponibilidad de los recursos hídricos superficiales utilizados para la agricultura, se ve afectada por la irregular distribución espacial y temporal de la precipitación, la insuficiencia o escaso mantenimiento de obras de regulación, la degradación de las cuencas y de la calidad del agua, entre otros; por lo cual, la población se ve en la necesidad de recurrir cada vez

más a fuentes de agua subterránea con fines de uso de riego. Sin embargo, uno de los efectos derivados de su uso extensivo en la agricultura (además del continuo agotamiento del recurso) es el impacto sobre la descarga natural de los acuíferos, ya sea como aporte de manantiales o como flujos de cauce, lo cual da como resultado un impacto sobre los caudales superficiales aguas abajo. Todo esto a su vez afecta de forma negativa la capacidad de producción de alimentos. Por lo cual, la seguridad alimentaria y la seguridad hídrica mundial se han visto afectadas en los últimos años debido al uso ineficiente de los recursos agua y tierra.

En el estado Portuguesa la extracción de agua subterránea representa una valiosa fuente del recurso utilizada con fines de riego, que ha sido difícil de controlar. La extracción intensiva de agua subterránea en la zona, podría superar las tasas de recarga natural en los acuíferos allí presentes, constituyendo un riesgo creciente para la producción alimentaria local. Dicha situación, aunada a las futuras presiones demográficas, el cambio climático y el aumento de la competencia por la tierra y el agua, pueden comprometer fuertemente la seguridad hídrica y alimentaria local. Es por ello, que resulta necesario proponer estrategias para el uso racional del agua subterránea con fines de riego en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa – Venezuela, considerando condiciones de cambio climático, que generen mejoras a largo plazo en relación a la producción agrícola sin causar perjuicios al ambiente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Proponer estrategias para el uso racional del agua subterránea con fines de riego, en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa – Venezuela, considerando condiciones de cambio climático.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar la situación actual del área de estudio para su caracterización geológica, geomorfológica e hidrogeológica.

- Analizar la variación del balance hídrico considerando condiciones de cambio climático, del acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare, mediante la estimación de la recarga natural utilizando un modelo paramétrico a escala mensual.
- Evaluar la disponibilidad del agua subterránea en el área de estudio, utilizando un modelo hidrogeológico conceptual, para la estimación del potencial de agua subterránea con fines de riego.
- Contrastar los requerimientos hídricos de cultivos seleccionados dentro del área de estudio con la disponibilidad de agua subterránea, a través de un programa computacional de uso libre, considerando condiciones de cambio climático para la propuesta de estrategias de uso racional del recurso.

1.4. Importancia y justificación del estudio

A pesar de que el agua se considere un recurso renovable en función del ciclo hidrológico, la contaminación y los esquemas de explotación que no consideran la tasa de recarga natural del acuífero pueden convertirla en un recurso no utilizable.

Los cambios en la disponibilidad, periodicidad y confiabilidad de las precipitaciones y de los recursos hídricos que surgen de ellas afectarán a todos los sectores que utilizan el agua. Dichos impactos, a su vez, afectarán la dinámica más amplia de las economías nacionales, así como también las necesidades ambientales y sociales, en particular en las sociedades más pobres.

El agua es el medio principal a través del cual el cambio climático hará sentir sus efectos sobre las personas, los ecosistemas y las economías. Por ende, la gestión de recursos hídricos debería constituir un enfoque preventivo para la adaptación al cambio climático. Sadoff y Muller (2010).

Por otro lado, tal como lo señala Alejua (2002), el estado Portuguesa se considera desde hace tiempo uno de los principales centros de producción de rubros agrícolas tales como cereales y oleaginosas, orientado a abastecer fundamentalmente la demanda agroindustrial. Cultivos como el ajonjolí, la caña de azúcar, el tabaco, el maíz, el arroz y el sorgo, entre otros, constituyen la mayor participación del estado Portuguesa en la producción nacional de cultivos industriales. En tal sentido, un uso racional del recurso agua subterránea utilizada

para riego constituirá una valiosa herramienta para mejorar la gestión del recurso hídrico y por ende la gestión de la variabilidad y los impactos futuros del cambio climático a nivel local.

Es importante señalar que, en la mayoría de las regiones que experimentan una estación seca extensa, el uso consuntivo irrestricto de agua para la agricultura genera normalmente una demanda excesiva para el riego de los cultivos con respecto a la disponibilidad de los recursos renovables del agua subterránea, dado que habitualmente extensas áreas de tierra cultivable se encuentran sobre los acuíferos. Dicha demanda excesiva para el riego de cultivos suele ocurrir debido a que en comparación con las aguas superficiales, las aguas subterráneas aportan a menudo mayores beneficios económicos por unidad de volumen debido a su disponibilidad local, potencial de escalamiento a la demanda, fiabilidad superior durante la sequía y, en general, buena calidad por lo que requiere un tratamiento mínimo.

Es probable que esta situación genere un extenso agotamiento de los recursos de agua subterránea, y consecuencias tales como: competencia por el recurso agua entre los usuarios del riego, conflictos con la provisión de agua potable rural, impactos sobre la descarga natural de los acuíferos, degradación de importantes ecosistemas dependientes del agua subterránea y deterioro de la calidad del agua.

Además, es posible que a largo plazo el creciente impacto del cambio climático afecte la disponibilidad de las aguas subterráneas, por lo cual, las reservas existentes en los acuíferos jugarán un papel clave en la adaptación a tales impactos, resultando sumamente importante el buen manejo y gestión del recurso. De allí que Sadoff y Muller (2010) consideren que el agua será el aspecto central de los riesgos y las respuestas inherentes a la adaptación al cambio climático.

Por todo lo mencionado, el presente estudio está enfocado en proponer estrategias para el uso racional del agua subterránea con fines de riego en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa – Venezuela, en condiciones de cambio climático; que armonicen el uso del agua subterránea para riego con el ritmo de recarga del acuífero.

1.5. Alcance

El uso racional del agua subterránea con fines de riego requiere conocer, de manera general, la oferta y la demanda del recurso en el área estudiada. Por ello, en esta investigación se estima la recarga natural del acuífero mediante el uso de un modelo paramétrico a escala mensual y se realiza una estimación del potencial de agua subterránea mediante la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual. Asimismo, se determinan los requerimientos de agua de cultivos representativos del área de estudio, tanto para el escenario histórico y actual como para escenarios futuros considerando condiciones de cambio climático.

Por consiguiente, el conocimiento de la oferta y la demanda potencial de agua subterránea con fines de riego en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa y las estrategias para el uso racional del recurso que se deriven en este trabajo sirven de apoyo a las instituciones encargadas de la Planificación y Gestión del agua (por ejemplo, el Ministerio del Poder Popular de Atención a las Aguas y la Gobernación del estado Portuguesa), para la toma de decisiones teniendo en cuenta la posible influencia que pueda tener el cambio climático en la disponibilidad del agua subterránea y los requerimientos de riego en la zona estudiada.

1.6. Limitaciones

Entre las limitaciones que dificultaron llevar a cabo el presente trabajo se encuentra la poca información disponible (precisa y actualizada) relacionada con las estaciones climáticas e hidrométricas presentes en el área de estudio y sus alrededores.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Tal como lo señala la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; FAO por sus siglas en inglés: *Food and Agriculture Organization* (2013), el agua tiene un papel importante en todos los sectores de la economía. Sin embargo, está empezando a ser un bien escaso como resultado de ciertas tendencias que son hasta cierto punto inevitables, especialmente el crecimiento de la población y, como consecuencia, el incremento de la demanda de agua para la producción de alimentos y para usos domésticos, industriales y municipales. Es por ello que el uso del agua debe ajustarse de una mejor forma a la creciente realidad de su escasez. Además, a lo anteriormente expuesto, se suma la variabilidad climática y los efectos del cambio climático que determinan, en gran medida, la estacionalidad de los cultivos, la evapotranspiración y la disponibilidad de agua, entre otros aspectos, esenciales para la producción de alimentos. En ese sentido, varios autores han realizado estudios relacionados con la temática del uso del recurso agua, la tierra y el cambio climático; algunos de los cuales sirven de referencia al presente trabajo y se señalan a continuación:

Cabrera (1980) en su tesis de maestría en la Universidad de Los Andes, titulada “Estimación de agua subterránea y políticas de explotación para la cuenca alta y media del río Portuguesa” delimitó la zona acuífera estudiada tanto en extensión de superficie como en profundidad hasta 80 m. Consideró los datos hidrogeológicos, partiendo de la litología predominante y pruebas por bombeo, niveles de agua, estableciendo la magnitud de las reservas acuíferas subterráneas. Para la determinación de la recarga, utilizó un modelo de simulación mensual para determinar la escorrentía. El volumen de reserva permanente estimado fue de $4825 \times 10^6 \text{ m}^3$. La reserva renovable fue estimada en $360 \times 10^6 \text{ m}^3$, para el período de septiembre de 1977. La extracción anual promedio del recurso hídrico subterráneo fue de $182.2 \times 10^6 \text{ m}^3$. El valor obtenido para la recarga por efecto de lluvia, basado en el modelo de simulación hidrológica mensual de la escorrentía, fue de $343 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Ramírez (2005) en su trabajo final de grado titulado “Evaluación de las disponibilidades de agua subterránea entre los ríos Morador y Sarare del estado Portuguesa”, para la Universidad de Los Andes, generó un modelo hidrogeológico conceptual y evaluó las reservas permanentes y la recarga natural del acuífero en esa zona; obteniendo un volumen de reservas permanentes permeables o valor máximo de espesores permeables de $3.38 \times 10^{10} \text{ m}^3$ y un valor promedio de recarga natural por precipitación de $227.84 \text{ l / m}^2 / \text{año}$.

Sadoff y Muller (2010) en un documento publicado por la Asociación Mundial del Agua; GWP por sus siglas en inglés: *Global Water Partnership*, titulado “La Gestión del agua, la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático: efectos anticipados y respuestas esenciales”, hacen hincapié en la forma en que el cambio climático afectará al agua y, de qué manera, una mejor gestión del agua puede contribuir a la mitigación del cambio climático y a la adaptación de aquellos efectos que ya son irreversibles. Dicho documento realiza un importante aporte en el debate actual sobre cómo abordar el cambio climático y sus consecuencias, sirviendo como un enfoque de adaptación temprana al cambio climático.

La FAO (2011), en su informe titulado “El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la Alimentación y la Agricultura” se refiere principalmente a la cuestión de la tierra y el agua para los cultivos. En este informe se examinan los tipos de respuestas de producción necesarias para satisfacer la demanda. Igualmente, se evalúa el potencial de los recursos mundiales de tierras y aguas para apoyar el incremento deseado en la producción y la productividad. También se examinan los riesgos y las compensaciones, y se abordan las opciones de gestión de los mismos sin perjudicar a la base de recursos.

Foster y Shah (2012) en un documento de perspectiva de la GWP titulado “Aguas Subterráneas y Agricultura de regadío: haciendo una relación beneficiosa más sostenible” exponen las interacciones existentes entre la agricultura de regadío, el agua superficial y el agua subterránea, haciendo énfasis en la necesidad de que exista una visión integrada para promover una gestión sostenible de tierras y agua. Señalan que se requiere la orientación de políticas claras y una acción local centrada para hacer un mejor uso de las reservas de agua subterránea para la mitigación de las sequías y la adaptación al cambio climático. Para ser efectivas las políticas deben estar hechas a medida de las configuraciones hidrogeológicas y las realidades agroeconómicas locales, y su implementación requerirá de “arreglos

institucionales” apropiados, participación integral de la comunidad agrícola y una mayor alineación de las metas de desarrollo agrícolas con la disponibilidad de aguas subterráneas.

Foster y Cherlet (2014) en un documento titulado *“The link between land use and groundwater: Governance provisions and management strategies to secure a sustainable harvest”*, presentan vínculos entre el uso de la tierra y el agua subterránea, y disposiciones de gobernanza y estrategias de gestión de estos recursos. En dicho documento se argumenta que es necesario un entendimiento común de la interacción entre el agua subterránea y la tierra para facilitar el diálogo intersectorial sobre las necesidades de gobernanza y los enfoques de gestión dirigidos a sostener los recursos hídricos y aumentar la productividad de la tierra. Señalan que las medidas de manejo del uso de la tierra enfocadas pueden producir beneficios significativos de calidad y cantidad de agua subterránea a un costo relativamente modesto y mejorar la gobernanza integrada será crucial para asegurar una cosecha aceptable de alimentos y agua subterránea de la tierra disponible.

La *Global Water Partnership* (2015), presenta un documento titulado *“Responding to the global food security challenge through coordinated land and water governance”*, con los resúmenes y conclusiones de los artículos presentados en un taller llevado a cabo en Pretoria, Sudáfrica. Dichos artículos proporcionaron un amplio respaldo e ilustración de cómo la gobernanza coordinada de la tierra y el agua tiene sentido, especialmente donde el logro o el mantenimiento de la seguridad alimentaria es una prioridad. Además, muestran la relación existente entre los recursos tierra y agua, evidenciando como el agua ya sea superficial o subterránea influye en el manejo de la tierra, y la manera como la gestión de la tierra influye en la calidad y cantidad de las aguas. Los debates generaron resultados sustanciales y recomendaciones para acciones futuras.

Vásquez (2019) en su tesis de maestría para la Universidad de Los Andes titulada *“Variación en el potencial de riego del sistema Las Majaguas bajo condiciones de cambio climático”*, llevó a cabo un análisis de la oferta y demanda de agua del sistema con y sin considerar la ocurrencia de cambio climático. Para lo cual inició con un diagnóstico del sistema, seguido de la estimación de los caudales de los ríos Cojedes y Sarare utilizando el modelo de simulación hidrológica a nivel mensual (SIHIM), para culminar con un análisis de las

demandas de agua del sistema para las condiciones de ocurrencia o no de cambio climático. El periodo futuro seleccionado para el análisis fue del año 2021 al 2050. Trabajó con los modelos climáticos avalados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su quinta comunicación. Del total de modelos se escogió el MPI-ESM-LR, el HadGEM2-Es y el GIS-E2-R. Tal como lo señala en su trabajo los resultados en cuanto a la disponibilidad de agua ratifican la importancia de considerar los efectos del cambio climático en los proyectos.

2.2. Bases teóricas

En los apartados siguientes se describen las bases conceptuales conexas a la investigación las cuales serán descritas en tres partes. En primera instancia, se desarrollan conceptos referentes al agua subterránea; luego, se presentan los conceptos relacionados con los modelos de simulación hidrológica y cambio climático; y finalmente, se describen algunos aspectos con respecto a la relación existente entre el agua, la agricultura y el cambio climático.

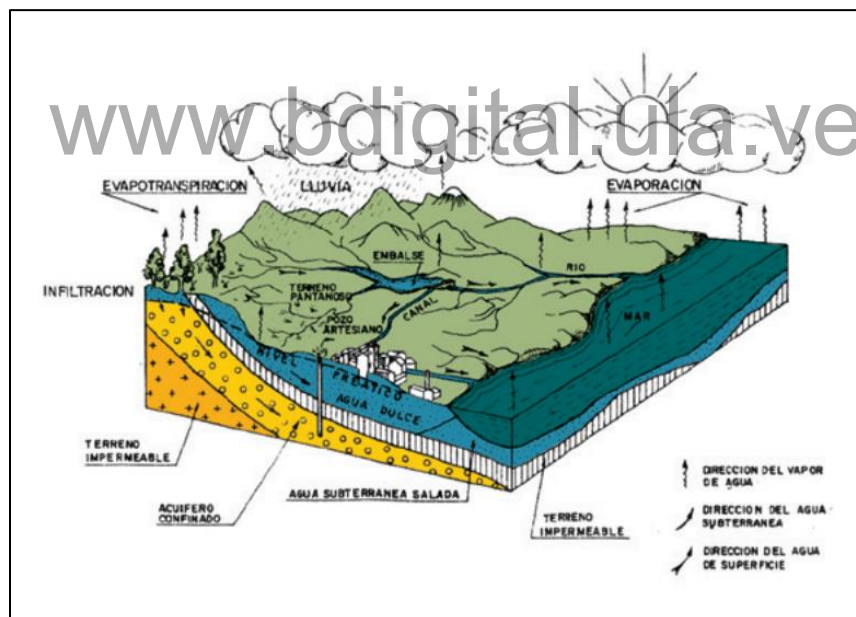
2.2.1. Agua subterránea

Se considera agua subterránea aquella parte del agua del ciclo hidrológico que está bajo la superficie del terreno. Su ocurrencia se da en varios tipos de espacios abiertos en las rocas, tales como fisuras, intersticios entre granos, poros, grietas, fracturas, planos de foliación, planos de falla y diaclasas; debido a las diferencias de presión hidrostática, esta agua permanece en continuo movimiento. Se puede decir entonces que la existencia, el movimiento y el almacenamiento del agua subterránea están controlados por la secuencia estratigráfica, la litología, los espesores y la configuración estructural de los materiales que conforman la corteza terrestre. Vélez *et al.* (2011).

2.2.1.1. Origen del agua subterránea

El ciclo hidrológico es el conjunto de procesos físicos que regulan y determinan la distribución y circulación del agua en la Tierra. En la naturaleza, ésta pasa por tres estados: sólido, líquido y gaseoso, en un movimiento cíclico permanente, en tres subsistemas: la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo. Vélez *et al.* (2011). En la Figura 2.1 se observa una representación del ciclo hidrológico.

El agua llega a la superficie terrestre en forma de precipitación (lluvia, nieve o granizo, rocío o escarcha); una pequeña parte es retenida en las irregularidades del terreno, otra se infiltra y otra fluye hacia los ríos, y finalmente llega a los mares y lagos, para luego evaporarse. De la porción de lluvia que se infiltra en el terreno, un porcentaje se almacena en las rocas, aumentando así las reservas de aguas subterráneas. Éstas pueden brotar luego en manantiales y descargar directamente a los cauces, lagos o mares, o el hombre podrá extraerlas para su uso. Por último, una parte del agua precipitada se retiene en el subsuelo para el uso de los seres vivos en actividades biológicas o se evapora, proceso que se conoce como evapotranspiración. El movimiento permanente del agua se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol, que proporciona la energía necesaria para elevar el agua del suelo, al evaporarla; la segunda, la gravedad, que hace que el agua condensada precipite y que, una vez sobre la superficie, vaya hacia las zonas más bajas. Custodio y Llamas (1976) en Vélez *et al.* (2011).



Fuente: Custodio y Llamas (1996) en Vélez *et al.* (2011).

Figura 2.1. Representación del ciclo hidrológico.

2.2.1.2. Parámetros hidrogeológicos fundamentales

Según Custodio y Llamas (1976) considerando los acuíferos como sistemas físicos que poseen un cierto funcionamiento, regulado por la recarga, extracciones, etc., se comprende que deben poseer unas ciertas características fundamentales de las cuáles dependa aquél. Estos parámetros son, concretamente, la porosidad, la permeabilidad (la transmisividad no es sino un producto de la permeabilidad por un espesor saturado) y el coeficiente de almacenamiento.

a) Porosidad: la porosidad de un material viene expresada por la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total. Custodio y Llamas (1976). Si se considera un cierto volumen de una muestra de una roca o suelo cualquiera se puede distinguir:

- Volumen de la parte sólida (V_s)
- Volumen de huecos (V_v)
- Volumen total ($V_t = V_v + V_s$)

En este supuesto la Ec. 2.1 muestra la expresión matemática que define este parámetro:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

n porosidad
V_v es el volumen de huecos
V_t Es el volumen total

b) Permeabilidad o conductividad hidráulica: este parámetro se define como el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente también unidad a una temperatura fija o determinada. Ob. cit.

En la Ec. 2.2 se observa la expresión matemática que define este parámetro:

$$k = \frac{v}{i} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

- k es el coeficiente de permeabilidad (tiene dimensiones de una velocidad)
- v es la velocidad media del flujo
- i es el gradiente hidráulico

c) Transmisividad: fue introducido por Theis en 1935, y se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada. Ob. cit. La Ec. 2.3 muestra la expresión matemática que define este parámetro, designado por T:

$$T = k \times b \qquad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

- T es la transmisividad, expresada en m²/día o cm²/seg
- k es el coeficiente de permeabilidad
- b es la altura del manto permeable saturado

d) Coeficiente de almacenamiento: se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura igual a la del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de carga hidráulica. El coeficiente de almacenamiento, representado por S, no tiene dimensiones. Custodio y Llamas (1976).

Asimismo, Custodio y Llamas (1976) indican que, en los acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz, es decir, al volumen de agua gravífica extraído de una unidad de acuífero saturado. Mientras que en los acuíferos cautivos entran en juego, los efectos mecánicos de compresión del terreno o de la propia agua.

En tal sentido, tal como lo señalan Custodio y Llamas (1976) el coeficiente de almacenamiento en los acuíferos libres coincide con la porosidad eficaz, sin intervención

directa del espesor del acuífero, y en cambio en los cautivos los únicos factores determinantes son los pequeñísimos efectos elásticos del agua y del acuífero, teniendo gran importancia el espesor de los acuíferos.

2.2.1.3. Síntesis de la gestión de las aguas subterráneas en Venezuela

La gestión del recurso hídrico se remonta a 1874, con el Ministerio de Obras Públicas y la Dirección de Vías de Comunicaciones Fluviales, Terrestres y Acueductos, en la década de los treinta del siglo XX que se crea la Dirección General de Recursos Hidráulicos, con la finalidad de planificar y construir las obras hidráulicas requeridas para el desarrollo económico y social de la nación. El aprovechamiento de las aguas subterráneas, se inicia en el país en el año 1936 y para la década de los años 40, con una población mayoritariamente rural, los principales problemas asociados con el agua consistían en incrementar la dotación de agua potable a las comunidades, construir el alcantarillado de las principales ciudades e iniciar la ejecución de obras de saneamiento de las aguas servidas. Durán (2011).

Además, según Durán (2011), en el año 1945 el Ministerio de Salud y Asistencia Social (MSAS) a través de la Dirección de Malariología, desarrolla un programa de perforación de pozos para abastecer los acueductos rurales con el fin de dotar de agua potable a poblaciones menores de 2000 habitantes y en 1961 se crea el Consejo Nacional de Recursos Hidráulicos, cuyo objetivo fue elaborar el Plan Nacional de Desarrollo de Obras Hidráulicas. Entre 1963 y 1965 el Ministerio de Agricultura y Cría (MAC) perforó más de 1000 pozos en el país. En 1966 se formuló el plan básico de exploraciones de aguas subterráneas y se inventariaron 6500 pozos de agua. Resulta igualmente relevante que entre 1969-1972 se crea el Departamento de Aguas Subterráneas, posterior División del Ministerio de Minas e Hidrocarburos (MMH). En 1967, fue creada la Comisión para el Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (COPLANARH), que realizó el primer inventario y diagnóstico de los recursos de aguas subterráneas en Venezuela, plan concluido en 1972 con la publicación del Atlas Hidrogeológico de Venezuela.

En 1977 se crea el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR), el cual plantea la concepción integral que comprende la investigación y la planificación, así como la construcción, operación y mantenimiento de obras, vigilancia y control y la asignación de los recursos para los diferentes usos. Por su parte, en el 2008, se

crea el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) adscrito al Ministerio del Ambiente, a fin de ofrecer los instrumentos técnicos para el andamiaje y la plataforma en la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos. Durán (2011).

2.2.1.4. Políticas de desarrollo de las aguas subterráneas en Venezuela

El INAMEH propone ejecutar programas de mediano y largo plazo que cumplan con los lineamientos generales de las políticas ambientales, programas y un conjunto de acciones inmediatas a corto plazo para planificar las exigencias de la situación de las aguas subterráneas en el país. Durán (2011).

De acuerdo con Durán (2011), la Ley de Aguas (2007), establece la planificación de la gestión integral de las aguas como una de las herramientas esenciales para el desarrollo de las políticas y estrategias, asimismo, establece la obligatoriedad de que la política hídrica en Venezuela se apoye y organice en planes de gestión integral de las aguas a nivel nacional, regional y de cuenca. La gestión integral de las aguas tiene como objetivo principal garantizar la conservación, protección, aprovechamiento sustentable y recuperación de las aguas tanto superficiales como subterráneas.

A pesar de que el tema del agua ha conseguido un mayor rango dentro del Ejecutivo Nacional, la legislación y los sistemas de gestión de recursos hídricos en Venezuela se desarrollan bajo una visión de aguas superficiales, no apropiada para aguas subterráneas, esto se puede constatar al detallar que en la Ley de Aguas aparece en el texto 406 veces la palabra “agua” y solo 10 veces “agua subterránea” y si bien esta Ley incluye el tema de las aguas subterráneas, en general lo hace de una manera muy ambigua que no permite su adecuada gestión. Jégat (2008) en Durán (2011).

2.2.1.5. Modelo conceptual de un sistema hidrogeológico

El producto de la exploración hidrogeológica básica en una zona determinada es un modelo conceptual del sistema acuífero existente, entendiendo un modelo conceptual como una representación pictórica del sistema de flujo de agua subterránea, frecuentemente en forma de un bloque diagrama o una sección transversal. El modelo conceptual comprende también las características de los parámetros hidráulicos de cada unidad, las posiciones de las superficies freáticas y piezométricas, por lo tanto, las condiciones de flujo subterráneo. Además, identifica zonas y procesos de recarga y evaluación de reservas. El propósito de

construir un modelo conceptual es simplificar el problema de campo y organizar los datos de manera que el sistema pueda ser analizado de manera efectiva. Esta simplificación es necesaria porque la reconstrucción completa del sistema es imposible. Bajo una perspectiva hidrogeológica, un modelo conceptual es una representación de un sistema hidrogeológico, es decir, de sus componentes y de las interacciones entre ellas. Las unidades hidrogeológicas reconocidas en un área de estudio son los componentes, y los flujos a través de ellas y entre ellas son los procesos. Betancur (2008) en Hernández (2015).

Antalia (2011) señala que un ambiente hidrogeológico puede ser representado por un modelo conceptual donde se integran parámetros geológicos, hidrológicos, edáficos, de vegetación y geomorfológicos que determinarán el régimen de flujo de agua subterránea en una región determinada. La variación espacial de todos esos parámetros tiene que ver, a su vez, con controles establecidos por tres elementos ambientales: topografía, modelo geológico y clima (precipitación y evaporación). Cada uno de estos elementos determina una parte del régimen de flujo del agua subterránea. Así, el clima determina la magnitud del agua presente en cada región, la topografía determina la distribución, movimiento, cantidad de energía y jerarquía del sistema de flujo; el modelo geológico establece las vías por donde circula el agua controlando la dirección y esquema de flujo, como también las características hidrogeoquímicas del agua, en particular su edad y la reacción agua- roca.

2.2.2. Modelos de simulación hidrológica y cambio climático

2.2.2.1. Simulación hidrológica

La simulación hidrológica es una técnica empleada en planificación, diseño y operación de sistemas de recursos hidráulicos. En la actualidad su uso se ha generalizado como consecuencia de la rápida difusión y aceptación de los computadores en la mayoría de nuestros países. En principio, los distintos modelos se desarrollaron en países foráneos a América Latina y luego fueron adaptados a las condiciones particulares de cada uno de sus usuarios. MARN (2004).

2.2.2.1.1. Modelo de simulación hidrológica a nivel mensual, SIHIM

El modelo de simulación hidrológica a nivel mensual, SIHIM, desarrollado en el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), por Duque y Barrios (1991), simula el sistema hidrológico regional, el cual como es sabido es un subsistema del ciclo hidrológico. 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. Debido a que el intervalo de cálculo es de un mes, se consideran solamente los procesos de larga duración como son: la evapotranspiración, la infiltración, la percolación, el escurrimiento y el flujo base, y se omiten los de corta duración como es el caso del flujo subsuperficial y de los almacenamientos de intercepción y en depresiones del terreno. MARN (2004).

En la Figura 2.2 se muestra la conceptualización del sistema hidrológico regional considerándose dos procesos fundamentales: uno de almacenamiento y otro de transferencia de masa de agua entre los almacenamientos.

En la aplicación del modelo a cuencas hidrográficas específicas, generalmente se procede a practicar una calibración de los parámetros del modelo. Entendiéndose a ésta como el proceso iterativo de ensayo y error, durante el cual se asignan valores a los distintos parámetros del modelo, hasta que los caudales o volúmenes simulados reproduzcan lo más fiel posible el registro histórico que de ellos se tiene. La calibración implica entonces, que se debe resolver numerosas veces el modelo de simulación, variando en cada resolución únicamente el valor que se asigna a los distintos parámetros. Duque y Barrios. (1991).

A continuación se muestra la formulación de todos los procesos que intervienen en el modelo, según Duque y Barrios. (1991):

a) Precipitación

En el modelo se determina la precipitación media a través del método de los polígonos de Thiessen, pero como 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. La formulación usada para determinar la precipitación media ajustada, para cada subcuenca, se presenta en la Ec. 2.4 y la Ec. 2.5:

$$PRE_{i,l} = \sum_{j=1}^{NEPRE} (PP_{i,j} \times PORCP_{j,l}) \times FACPRE_l \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$FACPRE_l = \frac{PMI_l}{PMT_l} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde

$PRE_{i,l}$ es la precipitación media ajustada, en el mes i para la subcuenca l ,

$PP_{i,j}$ es la fracción puntual durante un mes i en la estación j ,

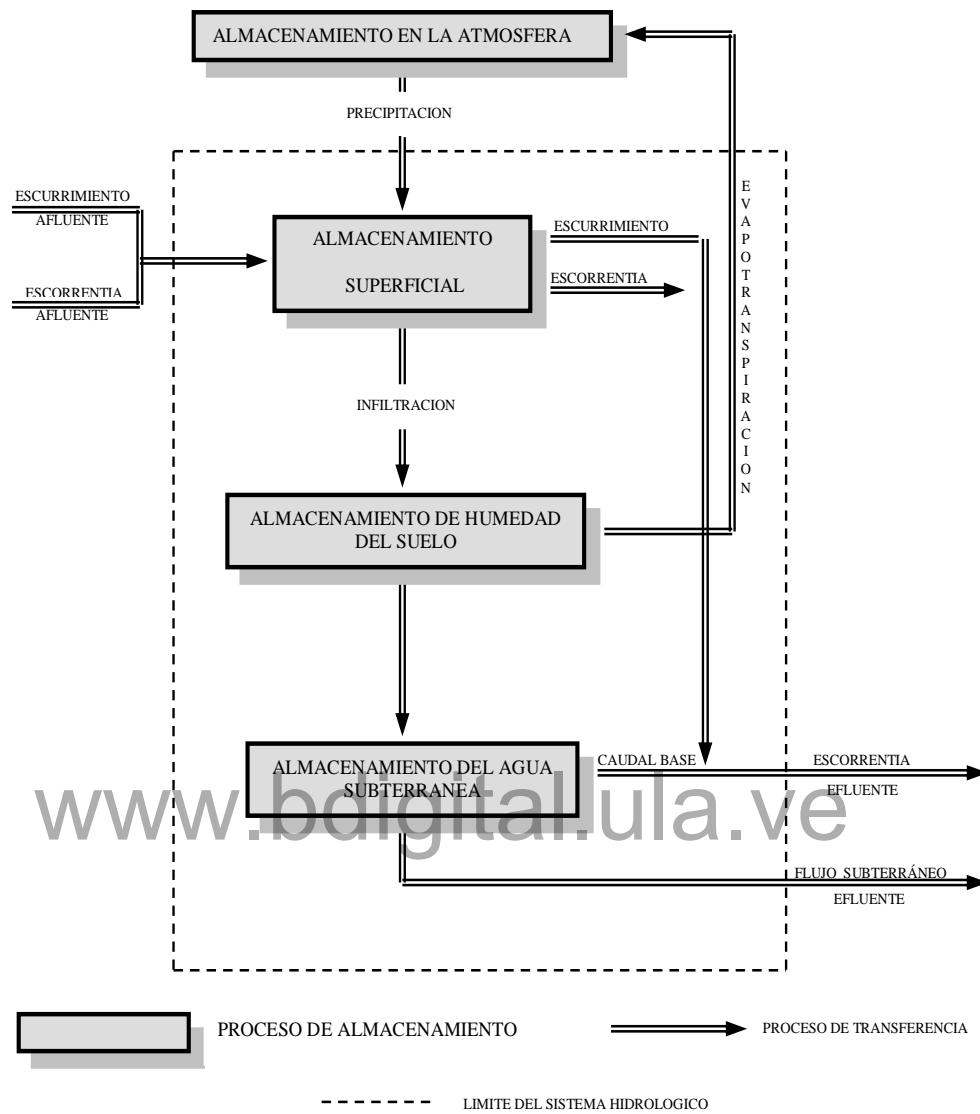
$PORCP_{j,l}$ es la fracción porcentual del área de la subcuenca l dominada por la estación de precipitación j ,

$NEPRE$ es el número total de estaciones de medición de precipitación usadas,

$FACPRE_l$ es el factor de ajuste de la precipitación media sobre la subcuenca l ,

PMI_l es la precipitación media estimada por el método de isoyetas para la subcuenca l

PMT_l es la precipitación media estimada por el método de Thiessen para la subcuenca l



Fuente: Duque y Barrios. (1991).

Figura 2.2. Conceptualización del Sistema Hidrológico Regional usado en el Modelo.

b) Evapotranspiración

El valor de la evapotranspiración potencial se considera como la evaporación medida en tina multiplicada por un cierto coeficiente, y además se supone 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 en la Ec. 2.6 y la Ec. 2.7:

$$EVM_{i,l} = \left(\sum_{j=i}^{NEVAP} EV_{i,j} \times PORCE_{j,l} \right) \times FACEVA_l \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$FACEVA_l = \frac{EMI_l}{EMT_l} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde

$EVM_{i,l}$ es la evaporación media ajustada, en el mes i para la subcuenca l ,

$EV_{i,j}$ es la evaporación puntual durante el mes i en la estación j ,

$PORCE_{j,l}$ es la fracción porcentual del área de la subcuenca l , dominada por la estación de evaporación j ,

$NEVAP$ es el número total de estaciones de evaporación usadas,

$FACEVA_l$ es el factor de ajuste de la evaporación media sobre la subcuenca l ,

EMI_l es la evaporación media estimada por el método de isopletas para la subcuenca l ,
y

EMT_l es la evaporación media estimada por el método de Thiessen para la subcuenca l

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, la formulación usada es la mostrada en las Ec. 2.8 - 2.10:

$$ETR_{i,l} = \begin{cases} ETP & , \text{si } HSM > CL \quad (\text{Ec. 2.8a}) \\ ETP \times \left(\frac{HSM}{CLE} \right) & , \text{si } HSM \leq CLE \quad (\text{Ec. 2.8b}) \end{cases} \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$ETP = EVM_{i,l} \times CT_l \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$CLE = 0.25 \times HSN_l \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde

$ETR_{i,l}$ es la evapotranspiración real en el mes i para la subcuenca l ,

ETP es la evapotranspiración potencial,

HSM es la humedad promedio del suelo para el mes,

CLE es el contenido límite de la humedad,

$EVM_{i,l}$ es la evaporación media en el mes i para la subcuenca l

CT_l es el factor para convertir la evaporación media en evapotranspiración potencial, y

HSN_l es el almacenamiento nominal de la humedad del suelo para la subcuenca l

c) Infiltración

En el modelo el valor de la infiltración potencial para el 100% del área se denomina $AINFP$ y se considera como función de la capacidad de infiltración del suelo, $CINF$, del almacenamiento nominal de la humedad del suelo, HSN , y de la humedad promedio del suelo para el mes, HSM . El valor de la infiltración potencial, $AINFP$, se calcula a partir de la Ec. 2.11:

$$AINFP = CINF \times \left(\frac{HSN_l}{HSM} \right)^2 \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde

$AINFP$ es la infiltración potencial,

$CINF_l$ es la capacidad de infiltración para la subcuenca l ,

HSN_l es el almacenamiento nominal de la humedad del suelo para la subcuenca l ,

HSM es la humedad promedio del suelo para el mes.

Dependiendo del valor del suministro de humedad, HDI , la infiltración real se determina como se ve en las Ec. 2.12 - 2.14:

$$AINFRE = \begin{cases} 0.5 \times AINFP & , si HDI > AINFP & (Ec. 2.12a) \\ HDI - \left(\frac{(HDI)^2}{2.0 \times AINFP} \right) & , si HDI \leq AINFP & (Ec. 2.12b) \end{cases} \quad Ec. 2.12$$

$$HDI = PRE_{i,l} + ASUPI \quad Ec. 2.13$$

$$ASUPI = ESCURT^{(i-1)} + ESCUTA \quad Ec. 2.14$$

Donde
 AINFRE es la infiltración real en el mes,
 HDI es la humedad disponible para infiltrar,
 ASUPI es la humedad inicial en el almacenamiento superficial,
 ESCURT⁽ⁱ⁻¹⁾ es el escurrimiento retardado, y
 ESCUTA es el escurrimiento total afluente

www.bdigital.ula.ve

d) Percolación

Se presentan dos casos para el cálculo de la fracción de la infiltración que percola, FPER, dependiendo del valor de la relación de almacenamiento de humedad del suelo, REL. La formulación usada para la simulación de este proceso es la siguiente (ver las Ec. 2.15 - 2.18):

$$PERC = FPER \times AINFRE \quad Ec. 2.15$$

$$REL = \frac{HSM}{HSN_i} \quad Ec. 2.16$$

$$POT = 10 \times REL - 0.75 + 1 \quad \text{Ec. 2.17}$$

$$FPER = \begin{cases} \left(\frac{1.0}{1.0 + POT} \right)^{POT} & , si REL < 0.75 \quad (\text{Ec. 2.18a}) \\ 1.0 - \left(2.0 + \frac{1.0}{1.0 \times POT} \right)^{POT} & , si REL \geq 0.75 \quad (\text{Ec. 2.18b}) \end{cases} \quad \text{Ec. 2.18}$$

Donde

- PERC es la percolación durante el mes,
 FPER es la fracción de la infiltración real que percola en el mes,
 REL es la relación de humedad del suelo, y
 POT es el factor para ajustar FPER y REL a la curva

e) Almacenamiento superficial

Se considera en el modelo que toda la precipitación entra a este almacenamiento y de allí sólo va a ser removida por la infiltración y por el escurrimiento, y también, debido a la escala del modelo, se engloba en este almacenamiento el volumen almacenado en la vertiente y en los cauces. A continuación se presenta la formulación usada para simular este proceso (ver la Ec. 2.19 y la Ec. 2.20):

$$ASUP = PRE_{i,t} + ESCURT^{(i-1)} + ESCUTA - AINFRE \quad \text{Ec. 2.19}$$

$$ASUPF = ASUP + ESCOTA + ESCORT^{(i-1)} - ESCD - ESCORR \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde

- ASUPF es el almacenamiento superficial final,
 ASUP es el almacenamiento superficial en el mes,
 ESCOTA es la escorrentía total afluente,
 ESCD es el escurrimiento,
 ESCORR es la fracción de ESCOTA y ESCORT⁽ⁱ⁻¹⁾ que forma parte de la escorrentía que sale en el mes, y

$ESCOR^{(i-1)}$ es la escorrentía retardada del mes anterior.

f) Almacenamiento de humedad del suelo

Se considera como humedad del suelo el agua almacenada en el perfil, lo cual es el resultado del balance entre la humedad existente en el suelo, la infiltración, la evapotranspiración real y la percolación. Las ecuaciones usadas son las siguientes (ver las Ec. 2.21 - 2.23):

$$HFS = HIS + (FNPER \times AINFRE) - ETR_{i,l} \quad \text{Ec. 2.21}$$

$$HSM = \frac{(HIS + HSF)}{2.0} \quad \text{Ec. 2.22}$$

$$FNPER = 1.0 - FPER \quad \text{Ec. 2.23}$$

Donde

HSF es la humedad final del suelo para el mes,

HIS es la humedad inicial del suelo para el mes,

FNPER es la fracción de la infiltración que no percola, y

HSM es la humedad del suelo en el mes.

g) Almacenamiento del agua subterránea

Se considera que este almacenamiento se alimenta de la percolación y el flujo subterráneo afluente, proveniente de un área diferente a la que está bajo consideración. El agua almacenada puede salir en forma subterránea como flujo subterráneo efluente o en forma superficial como caudal base. Las ecuaciones usadas son las siguientes (ver la Ec. 2.24 y la Ec. 2.25):

$$VF = AASI + PERC + FSUBA_l - QB - FSUBE_{(i-1)} \quad \text{Ec. 2.24}$$

$$VM = \frac{(AASI + VF)}{2.0} \quad \text{Ec. 2.25}$$

Donde
 AASI es el almacenamiento inicial,
 PERC es la percolación,
 FSUBA_{*l*} es el flujo subterráneo afluente a la subcuenca *l*,
 QB es el caudal base,
 VM es el almacenamiento promedio del agua subterránea,
 FSUBE_{*i,l*} es el flujo subterráneo efluente en el mes *i* para la subcuenca *l*, y
 VF es el almacenamiento final del agua subterránea.

h) Escurrimiento

El escurrimiento producido a la salida del área considerada durante un intervalo de tiempo dado, se calcula como una fracción de la diferencia entre la humedad disponible para infiltrar y la infiltración real. La humedad remanente pasa a formar parte del escurrimiento que saldrá en el siguiente intervalo de tiempo. La formulación usada es la siguiente (ver la Ec. 2.26 y la Ec. 2.27):

$$ESCD = PESC_l \times ASUP \quad \text{Ec. 2.26}$$

$$ESCURT^{(t)} = (1.0 - PESC_l) \times ASUP \quad \text{Ec. 2.27}$$

Donde
 ESCD es el escurrimiento durante el mes,
 ESCURT^(t) es el escurrimiento retardado, y
 PESC_{*l*} es la fracción del almacenamiento superficial que sale como escurrimiento durante el mes.

i) Caudal base

Es el flujo proveniente del almacenamiento del agua subterránea que sale a los cauces de la cuenca como caudal base, su formulación se muestra en la Ec. 2.28:

$$QB = PQB_l \times VM \quad \text{Ec. 2.28}$$

Donde

QB es el caudal base, y

PQB_l es la fracción del almacenamiento del agua subterránea que sale como caudal base.

j) Flujo subterráneo efluente

Es el flujo que sale de la cuenca o subcuenca en forma subterránea, su formulación se presenta en la Ec. 2.29:

$$FSUBE_{i,l} = PFSE_l \times VM \quad \text{Ec. 2.29}$$

Donde

FSUBE_{i,l} es el flujo subterráneo efluente en el mes i proveniente de la subcuenca, y

PFSE_l es la fracción del almacenamiento del agua subterránea que sale como flujo subterráneo efluente.

Es de hacer notar que de acuerdo a las ecuaciones Ec. 2.28 y Ec. 2.29 los coeficientes PQB_l y PFSE_l deben cumplir la relación de la Ec. 2.30:

$$PQB_l + PFSE_l \leq 1.0 \quad \text{Ec. 2.30}$$

k) 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, y el caudal base. Las ecuaciones usadas son las siguientes (ver las Ec. 2.31 - 2.33):

$$ESCT_{i,l} = ESCD + ESCORR + QB \quad \text{Ec. 2.31}$$

$$ESCORR = PESC_l \times (ESCOTA + ESCORT^{(i-1)}) \quad \text{Ec. 2.32}$$

$$ESCORT^{(i)} = (1.0 - PESC_l) \times (ESCOTA + ESCORT^{(i-1)}) \quad \text{Ec. 2.33}$$

Donde

$ESCT_{i,l}$ es la escorrentía total en el mes i , producida por la subcuenca l

$ESCORR$ es la escorrentía del mes,

$ESCORT^{(i-1)}$ es la escorrentía retardada del mes anterior, y

$ESCORT^{(i)}$ es la escorrentía retardada del mes i .

Por otro lado, según MARN (2004), la estructura y orden de cálculo de los diferentes procesos es el siguiente:

- a) Cálculo de precipitación, evaporación y evapotranspiración potencial (PRE, EVM, ETR).
- b) Cálculo de los procesos de transferencia y almacenamiento relacionados con la humedad del suelo (AINFRE, AISUP, PERC, ETR, HSF).
- c) Cálculo de los procesos de transferencia y de almacenamiento relacionados con el almacenamiento del agua subterránea (QB, FSUBE, VF).
- d) Cálculo del escurrimiento y almacenamiento superficial (ESCD, ASUPF).
- e) Cálculo de escorrentía total (ESCT).

La solución del modelo se hace por simple sustitución del valor de las variables discretas en las ecuaciones, debido a que estas son de tipo algebraico. Existe, sin embargo, una condición de dependencia entre procesos de transferencia y procesos de almacenamiento, que no permite resolver secuencialmente las ecuaciones usadas para la simulación de los procesos. En tales casos el método general de solución empleado consiste en: suponer un valor de almacenamiento promedio durante el intervalo de tiempo que se analiza, resolver las expresiones matemáticas usadas para simular los procesos de transferencia, calcular a

partir de los resultados obtenidos anteriormente el valor del almacenamiento final y calcular el almacenamiento promedio. Si este último no difiere significativamente del asumido al inicio se aceptan los resultados, en caso contrario se repite el proceso.

2.2.2.2. Cambio climático.

El cambio climático ha sido definido como una importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). Ovalles *et al.* (2008).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC por sus siglas en inglés: *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2008) señala en cuanto a los impactos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua dulce en el futuro, que es muy probable que los costos del cambio climático sean, en términos mundiales, mayores que los beneficios. Una de las razones es el muy probable aumento de la variabilidad de la precipitación, y una previsible mayor frecuencia de crecidas y sequías.

La variabilidad natural del clima origina riesgos para las actividades socioeconómicas. La agricultura de secano se ve afectada tanto en los seres vivos como en la oportunidad de realizar labores; la agricultura regada depende de embalses y pozos cuya capacidad también será alterada por el cambio climático. Martelo y Pérez. (2010).

Tal como se señala en MARN *et al.* (2005) no hay realmente forma de predecir cómo será el clima futuro, ya que aún no es completo el conocimiento del sistema climático, por lo que manejar el concepto de incertidumbre es importante. Se sabe que el efecto antrópico se añade a todas las interacciones naturales, pero aún si fuera posible simular perfectamente la parte física del sistema climático (poco probable en el corto plazo) quedarían por resolver otros dos tipos de incertidumbres: una de carácter socioeconómico, relativa a cuánto más Gases de Efecto Invernadero (GEI) habría en la atmósfera, ya que eso depende exclusivamente de factores como las tasas de crecimiento demográfico y económico, el crecimiento en el uso y tipo de energía, los avances tecnológicos en materia energética, las políticas mundiales sobre la emisión de Gases de Efecto Invernadero, entre otros; el segundo tipo de incertidumbre es el relativo a la sensibilidad climática.

Dada esta circunstancia, la estrategia para analizar el clima futuro y su impacto en los ecosistemas y las actividades humanas, es el desarrollo de escenarios. Éstos no son predicciones ni pronósticos, sino “una descripción plausible, coherente e internamente consistente de un posible estado futuro del mundo”. IPCC (2001) en MARN *et al.* (2005). Deben ser entendidos como ejemplos de lo que pudiera pasar bajo premisas particulares. Los escenarios climáticos se basan en escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, que a su vez se basan en escenarios socioeconómicos.

Según Martelo y Pérez (2010) para trabajar en cambio climático se establecen escenarios bajo los cuales se corren los modelos climáticos para obtener, considerando las incertidumbres, un abanico de posibles comportamientos futuros del clima. Si varios modelos, corridos bajo escenarios diferentes apuntan todos en la misma dirección, la incertidumbre disminuye.

Los escenarios climáticos se definen como combinaciones de los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero y los niveles de sensibilidad climática. Para simular los elementos de precipitación y temperatura en el futuro, que son modificados por los cambios en el sistema climático inducidos por el calentamiento debido a la mayor cantidad de GEI, se utilizan modelos acoplados de circulación general atmósfera océano (MACGAO), corridos para los escenarios climáticos. Dado que los MACGAO son una herramienta tecnológica que requiere un enorme poder computacional, disponible en muy pocos lugares del mundo, el programa de apoyo a las comunicaciones nacionales de los países, coordinó el desarrollo de una metodología simplificada, que se materializó como el *software* *MAGICC/SCENGEN Model for the Assessment of Greenhouse Induced Climate Change/ Scenario Generator* (Hulme *et al.*, 2000 en MARN, 2005), desarrollado por la *Climate Research Unit (University of East Anglia, UK)*. El componente *MAGICC* es un modelo climático simplificado, que permite determinar la temperatura media global y las consecuencias en el nivel del mar a partir de emisiones de Gases de Efecto Invernadero especificadas por el usuario. El componente *SCENGEN* es en esencia una biblioteca de corridas de 16 de los MACGAO más utilizados en el mundo. MARN *et al.* (2005).

Vásquez (2019) señala que otra opción para el análisis de las proyecciones del clima a través de los modelos climáticos 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. En la Tabla 2.1 se muestran los modelos utilizados en el quinto informe de evaluación del IPCC.

Tabla 2.1. Modelos climáticos utilizados en el Quinto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

Modelos utilizados en el Quinto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático			
País	Centro de Investigación	Acrónimo del Centro	Modelo
China	<i>Beijing Climate Center</i>	BCC	BCC-CSM1.1
Francia	<i>Centre National de Recherches Meteorologiques</i>	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5
	<i>Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique</i>		
Australia	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Bureau of Meteorology</i>	CSIRO-BOM	ACCESS1.0
Rusia	<i>Russian Academy of Sciences</i>	IMM	INM-CM4.0
	<i>Institute of Numerical Mathematics</i>		
Brasil	<i>National Institute For Space Research</i>	INPE	HadGEM2-ES
Francia	<i>Institut Pierre Simon Laplace</i>	IPSL	IPSL-CM5A-LR
Japón	<i>Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokio)</i>	MIROC	MIROC-ESM
	<i>National Institute for Environmental Studies, and</i>		MIROC-ESM-CHEM
	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>		MIROC5
Reino Unido	<i>Met Office Hadley Centre</i>		HadGEM2-CC
			HadGEM2-ES
Alemania	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>	MPI-M	MPI-ESM-LR
Japón	<i>Meteorological Research Institute</i>		MRI-CGCM3
EEUU	<i>NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies)</i>		GISS-E2-Rp1
EEUU	<i>National Center for Atmospheric Research</i>	NCAR	CCSM4
		NSF-DOE-NCAR	CESM1(CAM5.1.FV2)

Modelos utilizados en el Quinto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático			
País	Centro de Investigación	Acrónimo del Centro	Modelo
Noruega	<i>Bjerknes Centre for Climate Research,</i>	NCC	NorESM1-M
	<i>Norwegian Meteorological Institute</i>	NMI	
Corea del Sur	<i>National Institute of Meteorological Research,</i>	NIMR	HadGEM2-AO
	<i>Korea Meteorological Administration</i>	KMA	
EEUU	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>		GFDL-CM3
			GFDL-E2M2G

Fuente: Tomado de Vásquez (2019).

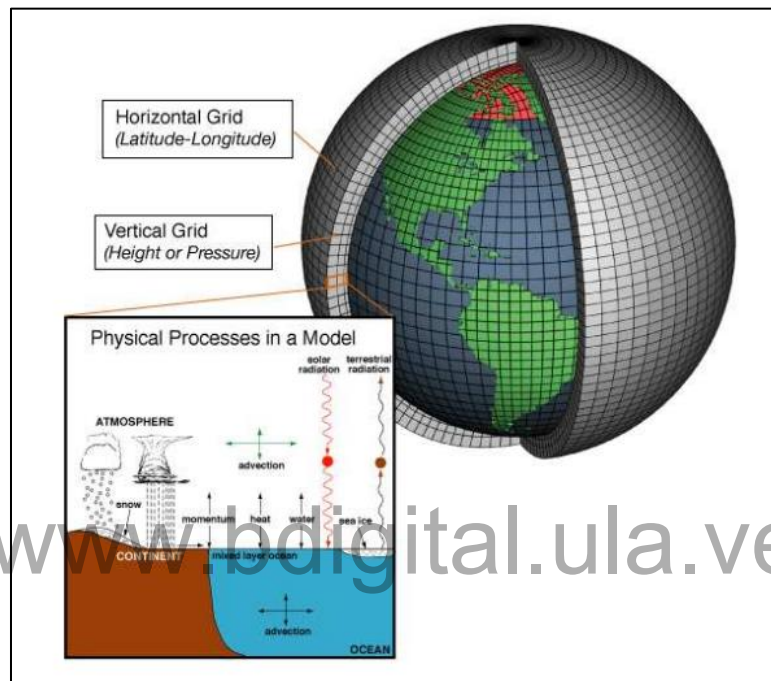
Cuando se realiza la modelación de escenarios globales se parte del hecho de que no existe la certidumbre total de que las condiciones futuras sean las que se supusieron en los escenarios; sin embargo, es un punto de partida que ha sido acordado por la comunidad científica mundial. Al realizar la modelación de los futuros dados por los escenarios, es necesario recurrir a modelos dinámicos que puedan representar adecuadamente el ciclo del carbono y las ecuaciones matemáticas involucradas en la simulación del sistema atmósfera-tierra-mar. Oviedo y León (2010).

2.2.2.2.1. Escenarios de emisiones de cambio climático

Los escenarios de cambio climático se construyen con base en las estimaciones climáticas realizadas con los modelos climáticos globales que hacen uso de ecuaciones matemáticas para describir el comportamiento de los factores que impactan el clima. Oviedo y León (2010).

Oviedo y León (2010) señalan que, hay varios tipos de modelos de clima. Desde modelos simples, los cuales se basan en determinados componentes que afectan el clima tales como la atmósfera y los océanos o modelos muy complejos que integran varios factores de la atmósfera, biósfera, geósfera, hidrósfera, y criósfera, y tienen en cuenta las interacciones y retroalimentaciones que se dan entre ellos. Los modelos simples de circulación general de la atmósfera, manejan las leyes básicas de la física, la dinámica de fluidos y la química aplicadas a la atmósfera, tales como la conservación de la masa, la energía y el momento,

para representar en tres dimensiones la atmósfera en forma de cuadrícula o retícula, que están regularmente espaciados; los modelos hacen cálculos para obtener los vientos, la transferencia de calor, la radiación, la humedad relativa e hidrología superficial en cada retícula y evalúan las interacciones entre puntos contiguos. En la Figura 2.3 se observa la estructura conceptual de un modelo de circulación general de la atmósfera.



Fuente: NOAA (2008) en Oviedo y León (2010).

Figura 2.3. Estructura conceptual de un modelo de circulación general de la atmósfera.

Para la construcción de escenarios climáticos se han utilizado los modelos de circulación general atmósfera-océano. Estos modelos tienen una representación tridimensional de un modelo de circulación general de la atmósfera acoplado a otro de circulación general del océano. Caracterizan el clima global con una resolución horizontal que varía entre 250 y 600 km para distintas capas verticales, entre 10 y 20 capas en la atmósfera y hasta 30 en los océanos. Oviedo y León (2010).

Del mismo modo, Oviedo y León (2010) indican que, con los modelos de circulación general atmósfera-océano se han hecho las proyecciones de cambio climático para diferentes

escalas espaciales y diferentes períodos usando 23 modelos para la simulación del clima mundial de centros de modelamiento climático de países como China, Noruega, Canadá, Estados Unidos, Francia, Australia, Reino Unido, Alemania, Rusia y Japón. Los modelos usados son de diferentes resoluciones espaciales, algunas gruesas del orden de $4^{\circ} \times 5^{\circ}$, mientras que se cuentan con otras bastante finas de $1.1^{\circ} \times 1.1^{\circ}$, como el modelo MIROC3.2 (hires) del *Center for Climate System Research (University of Tokyo)*, *National Institute for Environmental Studies*, and *Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)*, del Japón.

Los modelos de circulación general atmósfera-océano no sólo hacen simulación del clima pasado y el actual, sino que con ellos se pueden hacer proyecciones de la influencia antropogénica en el clima futuro. Estas proyecciones se realizan con distintos escenarios de emisiones que proporcionan estimaciones de todos los gases de efecto invernadero a largo plazo. Estos escenarios son usados como agentes de forzamiento radiativo en las corridas de los modelos para tiempos futuros con el fin de construir los probables cambios del clima venidero. Oviedo y León (2010).

2.2.2.2.2. Modelos climáticos globales

Según Oviedo y León (2010), la representación matemática del comportamiento de la atmósfera se hace a partir de las ecuaciones básicas que describen el flujo de masas de aire, el equilibrio térmico, el equilibrio hidrostático, el balance energético, la continuidad del aire seco y la continuidad de la humedad, principalmente. A este conjunto de ecuaciones se le denomina Modelo. Cuando el interés es, además, representar el comportamiento atmosférico de todo el planeta, se dice que el modelo es global, y si se desea simular los patrones generales de las variables atmosféricas a través del tiempo y su respuesta ante los cambios de factores que influyen en su comportamiento, tales como la radiación o el incremento de los gases de efecto invernadero, se dice que el modelo es climático.

Los modelos climáticos globales suelen ofrecer información a escalas superiores a los 2.5° , que difícilmente puede ser aplicada de manera directa a una región o lugar concreto, se hace necesario producir información más aproximada a las condiciones climáticas reales de esa región o lugar, lo cual conlleva a reducir de escala dichos resultados. Oviedo y León (2010).

Además, según Oviedo y León (2010), una metodología que se ha utilizado ampliamente en los últimos años es la de regionalización estadística y dinámica (*statiscal downscaling* y *dinamical downscaling*). En el primero se utilizan los datos de observaciones para ajustar las salidas del modelo a la realidad regional; en el segundo se utilizan modelos de alta resolución espacial o modelos climáticos regionales que representan procesos en mayor detalle que los modelos globales. Los modelos climáticos regionales son una versión de la regionalización dinámica (*dynamical downscaling*) de los modelos globales.

Los resultados de los modelos globales deben ser evaluados, de acuerdo con Oviedo y León (2010), ya que habrá modelos que simulen adecuadamente algunas variables para la zona de estudio y habrá modelos que no provean resultados satisfactorios para las mismas, por lo que será necesario hacer regionalización con condiciones de frontera diferentes para cada variable meteorológica a proyectar.

2.2.2.2.3. Escenarios de cambio climático regionales y locales a partir de los modelos globales

La generación de escenarios regionales y locales se puede hacer utilizando modelos dinámicos que simulen el comportamiento de la atmósfera a través de las ecuaciones de la física a la cual responden o modelos estadísticos que se basan en registros reales de las variables meteorológicas expresando en funciones de distribución de probabilidad el comportamiento histórico de las variables meteorológicas. Se tiene también que los resultados de modelos dinámicos pueden ser refinados con técnicas estadísticas, es decir, son métodos híbridos para modelar el clima regional presente y futuro. Las proyecciones a escala regional y los escenarios climáticos regionales se derivan de los modelos globales mediante procedimientos de tipo físicodinámico, estadístico, combinando las dos técnicas anteriores y, según Wilby y Dawson (2004), mediante inferencias subjetivas. El fin es obtener una mayor resolución de la información a partir de reducción de la escala espacial. Una vez se tienen las proyecciones de cambio climático regionales o locales, se debe pasar a los estudios de vulnerabilidad, definir planes de adaptación y formular políticas de mitigación según los efectos esperados ante los posibles cambios del clima. Oviedo y León (2010).

2.2.2.2.4. Investigaciones sobre el cambio climático en Venezuela

Tal como lo señala MARN (2004), en el Taller Internacional sobre Variabilidad y Cambios Climáticos en Venezuela y el Caribe, efectuado en Mérida, en abril de 1990, se formularon los primeros escenarios sobre cambios climáticos (precipitación y temperatura) para Venezuela. En dicho taller se consideraron de manera general, los impactos que hipotéticamente podrían ejercer los cambios, en cuanto a temperatura y precipitaciones, en el sector agrícola (se tomó como ejemplo el maíz) y sus efectos en las variables hidrológicas. Además, MARN (2004) señala que, la Dirección de Hidrología del MARN utilizando el programa *MAGICC/SCENGEN* generó en función de escenarios de emisiones, los cambios futuros para precipitación, temperatura y nivel del mar, que al ser aplicados a modelos de circulación general de la atmósfera y mediante un proceso simplificado de “*Downscaling*” obtuvieron los cambios en las mencionadas variables para las mallas de 5° x 5° que cubren a Venezuela.

El grupo de trabajo elaboró los escenarios a partir de la situación actual representada por la lluvia promedio actual o normal para el período 1961-1990, a partir de dicho período se definieron tres puntos del futuro: 2020, 2040 y 2060, para los cuales fue posible determinar la lluvia promedio futura en función de los resultados porcentuales de cambio obtenidos por los modelos CCC-EQ y UKTR para cada una de las mallas de referencia. MARN (2004).

2.2.2.2.5. Visión histórica del cambio climático a nivel mundial

La Marea (2019) repasa los últimos 40 años de cumbres climáticas y ciencia en un artículo donde destacan los siguientes acontecimientos:

En 1979, un grupo de expertos en clima estableció, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), la base científica del cambio climático. El Informe Charney – denominado así por Jule Charney, quien lideró la investigación– alertaba de las consecuencias del incremento de dióxido de carbono en la atmósfera. Entre ellas, lo que hoy se conoce como calentamiento global. A pesar de que sus predicciones en el aumento de la temperatura mundial son ahora una realidad, el estudio no logró en aquel momento impacto social ni político. Ese año, además, se celebró la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima en Ginebra (Suiza), en la que participaron organismos como la Organización

Meteorológica Mundial (OMM), la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA), la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) o la UNESCO.

En 1988, la divulgación de la ciencia climática se materializó con la creación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Fue fundado por el Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y la OMM. Tres décadas después, cuenta con la participación de especialistas de 195 países. Su papel ha sido determinante para generar consensos en la comunidad científica e influir en las políticas públicas.

En 1989, representantes de 67 gobiernos, 11 organizaciones internacionales y la Comisión de la Comunidad Europea acudieron a Noordwijk, en los Países Bajos, para celebrar una conferencia que tenía como objetivo principal alcanzar compromisos para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque se llevó a cabo una declaración política, no se adoptaron medidas concretas.

En 1990, el IPCC y la Segunda Conferencia Mundial sobre el clima pidieron un tratado sobre el cambio climático, después de que el primero publicara en Sundsvall (Suecia) el primer informe de evaluación que confirmaba científicamente evidencias sobre el cambio climático. La reducción de las emisiones que causan el calentamiento global fue una de las cuestiones principales para alrededor de 500 científicos que se dieron cita en Ginebra en este segundo encuentro internacional.

En 1992, la primera Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro, dio lugar a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), que tiene como objetivo prevenir la interferencia humana “peligrosa” con el sistema climático. Un total de 197 países han ratificado este acuerdo.

No fue hasta 1994 cuando entró en vigor la CMNUCC. Entonces, había menos evidencia científica sobre el cambio climático de la que existe ahora y se tomó como línea de trabajo la que establecía el Protocolo de Montreal en 1987: obligar a los Estados a actuar para la seguridad humana. El objetivo final de la Convención era claro: estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y hacerlo en un periodo de tiempo

suficiente para que los ecosistemas pudieran adaptarse naturalmente al cambio climático y para asegurar la producción de alimentos y permitir un desarrollo económico sostenible. En 1995, se celebró la primera Conferencia de las Partes (COP) en Berlín, donde los países participantes iniciaron las negociaciones para implementar la respuesta mundial al cambio climático.

En 1997, en la COP3, celebrada en Kyoto, los países industrializados se comprometen a poner en marcha un plan real frente al calentamiento global: el Protocolo de Kyoto. Según este plan, se debían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 5.2% entre 2008 y 2012 con respecto a 1990, un objetivo que no se logró.

En 2002, se celebra una segunda Cumbre de la Tierra en Johannesburgo. Allí, por primera vez, participan agentes de la sociedad civil además de los gobiernos y las grandes empresas. De nuevo, el cambio climático es una de las principales cuestiones que se tratan.

En 2005, el Protocolo de Kyoto entra en vigor el 16 de febrero. Se celebra una primera reunión de los países firmantes en Montreal (Canadá) con ausencia de los países más contaminantes: Estados Unidos, China e India. Allí se acuerda lo que después –en 2006– se convertiría en el Programa de Trabajo de Nairobi sobre los efectos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático.

Llega el cuarto Informe de Evaluación del IPCC en el año 2007. Hasta la fecha, era el estudio más amplio y detallado sobre la situación climática. Señalaba efectos del calentamiento global –ya que los atribuía al incremento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera– como el deshielo generalizado y el aumento promedio tanto del nivel del mar a nivel mundial como de la temperatura del aire y de los océanos.

La conciencia colectiva comenzó a despertar en 2014 tras la publicación del quinto Informe de Evaluación del IPCC, que acaparó la atención mundial. Los impactos del calentamiento global de los que la comunidad científica ya venía advirtiendo comenzaban a ser cada vez más visibles en todos los continentes. Desde el IPCC señalaban también que si la temperatura global aumentaba más de 2°C, los daños en el planeta serían irreversibles.

Por su parte, la COP 21, que se celebró en París en el año 2015, reunió a los países firmantes de la CMNUCC, alcanzando un pacto hasta entonces histórico a la hora de combatir el cambio climático: el Acuerdo de París. Su principal objetivo era reforzar la respuesta política para mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 °C, pero también para hacer todo lo posible por no superar los 1.5 °C. Actualmente, son 184 los países que han firmado este acuerdo. Sin embargo, en su último informe anual sobre la Brecha de Emisiones, publicado en noviembre de 2019, Naciones Unidas alertaba de que esas metas están cada vez más lejos.

Por último, señalan que tras ser planificada inicialmente en Brasil y Chile, la COP25 se acabó celebrando en Madrid en 2019. La cumbre climática, la primera que tuvo lugar en España, se convirtió en la más larga de la historia tras extenderse más de 40 horas sobre el cierre previsto por la falta de consenso. No se regularon ni los mercados de emisiones ni otros de los grandes objetivos de la cita.

2.2.3. Escasez del recurso agua, el papel de la agricultura y cambio climático

FAO (2013) señala que, el uso de agua sin restricciones ha crecido a nivel global a un ritmo de más del doble del aumento de la población en el siglo XX, hasta tal punto que en muchas regiones ya no es posible el suministro de un servicio de agua fiable. La presión demográfica, el ritmo de desarrollo económico, la urbanización y la contaminación están ejerciendo una presión sin precedentes sobre un recurso renovable pero finito, sobre todo en regiones áridas y semiáridas.

Asimismo, FAO (2013) indica que la agricultura es el sector económico en el que la escasez de agua tiene más relevancia. También es el sector con más posibilidades u opciones de ajuste. En la actualidad, la agricultura es responsable del 70% de las extracciones de agua dulce y de más del 90% de su uso consuntivo. Bajo la presión conjunta del crecimiento de la población y de los cambios en la dieta, el consumo de alimentos está aumentando en casi todas las regiones del mundo.

De acuerdo a FAO (2013), a nivel global, las extracciones de agua para uso doméstico solo representan el 10% de todos los usos y tienen una tasa de consumo muy baja – la mayor parte del agua de uso doméstico vuelve al medio ambiente con unas pérdidas mínimas por

evaporación incluso si se ha degradado su calidad. Por el contrario, el uso agrícola tiene consecuencias directas aguas abajo ya que la producción de biomasa precisa grandes cantidades de agua que se perderán por transpiración. Si el agua se usa para regar y se pierde por transpiración, esto supone una pérdida hidrológica local que reduce la disponibilidad de agua en las zonas situadas aguas abajo.

En casi todas las regiones del mundo, la evapotranspiración desde tierras agrícolas regadas es, con mucho, el mayor uso consuntivo del agua extraída para uso humano. El uso del agua en agricultura sigue estando determinado por el crecimiento constante de la demanda de productos agrícolas para satisfacer las necesidades de una población en aumento. El resultado neto de todo esto es que el uso del agua para la agricultura está aumentando la severidad de la escasez de agua en algunas zonas, y causando escasez incluso en áreas con un buen nivel relativo de recursos hídricos. FAO (2013).

Por consiguiente, según FAO (2013), la agricultura es al mismo tiempo una causa y una víctima de la escasez de agua. La competición intersectorial por el agua es más evidente en los grandes centros urbanos, pero la escasez de agua puede surgir en cualquier área de captación en la que la intensificación de la agricultura en las áreas de cabecera reduzca el suministro de agua aguas abajo. El uso insostenible del agua subterránea puede tener impactos a largo plazo en la producción agrícola.

La explotación de aguas subterráneas ha crecido exponencialmente en escala e intensidad a lo largo de las últimas décadas. Los agricultores han visto como una gran ventaja la capacidad del agua subterránea para ofrecer un suministro flexible y a demanda para el riego. La intensificación del uso de agua subterránea ha contribuido a mejorar las vidas de millones de personas en áreas rurales, pero también ha resultado en el agotamiento a largo plazo de los acuíferos, en la contaminación del agua subterránea y en la intrusión salina en importantes acuíferos costeros. FAO (2013).

Las ediciones del Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo (ONU-Agua, 2009, 2012) contemplan cómo las distintas crisis globales ocurridas recientemente – cambio climático, energía, seguridad alimentaria, recesión económica y turbulencias financieras – están relacionadas entre sí y tienen un impacto sobre el agua.

Por su parte, FAO (2017) señala que, el cambio climático es un reto trascendental de nuestro tiempo. Las precipitaciones, inundaciones, tormentas, olas de calor y sequías están aumentando en frecuencia e intensidad y los efectos se multiplican y hacen sentir con intensidad. Estos fenómenos climáticos extremos, junto con los cambios paulatinos tales como la elevación de las temperaturas y del nivel del mar, están afectando cada vez más a los ecosistemas y recursos naturales que condicionan el sustento y bienestar de millones de personas.

FAO (2017) también resalta que, la agricultura, incluida la silvicultura y la pesca, es especialmente vulnerable al cambio climático, pero también es un factor importante que contribuye a él. Sin contener el aumento de las emisiones de GEI procedentes de la agricultura, no podrán alcanzarse las metas del Acuerdo de París.

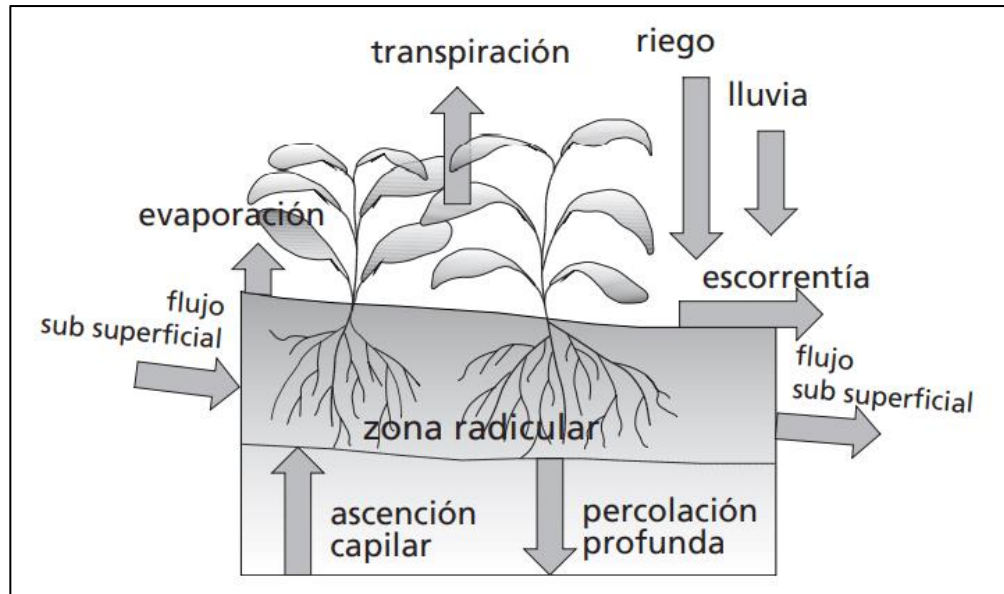
En efecto, según FAO (2017), la agricultura causa el 24% de las emisiones de GEI de origen humano, mientras que las pérdidas y residuos de alimentos son responsables de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de GEI.

2.2.3.1. Requerimientos hídricos de un cultivo

La escasez generalizada de agua para la agricultura ha generado una fuerte necesidad de crear estrategias orientadas a mejorar la eficiencia de su uso. Una de ellas es la de conocer las necesidades de agua de cualquier cultivo, esta se define como la cantidad de agua que debe tener el suelo para que la planta pueda satisfacer sus procesos fisiológicos y poder tener un desarrollo óptimo. Están constituidas por el agua evaporada desde la superficie libre del suelo y la transpirada por la planta. Romero *et al.* (2009).

Castañon (2000) citado en Romero *et al.* (2009), señala lo difícil de separar en la práctica una de la otra y la falta de sentido y utilidad, pues el suelo debe tener la capacidad de aportar toda el agua perdida. En consecuencia, se utiliza el término de evapotranspiración, el cual se define como la cantidad de agua perdida bajo forma de vapor, desde una superficie cubierta de vegetación, para estimar las necesidades hídricas de las plantas. Dichas necesidades se miden en mm/día y dependen en el tiempo de diversos factores: clima (condiciones meteorológicas), características del suelo (propiedades físicas) y el propio cultivo (especie, genotipos y estados fenológicos). En la Figura 2.4 se observa una

representación teórica de los intercambios de agua que ocurren en el sistema conformado por las plantas, el suelo y la atmósfera en un período de tiempo determinado.



Fuente: FAO (2006).

www.bdigital.ula.ve
Figura 2.4. Balance de agua en el suelo en la zona radicular.

La evapotranspiración puede medirse directamente, con lisímetros, e indirectamente con métodos micrometeorológicos, pero puede estimarse mediante diferentes modelos, más o menos empíricos, a partir de registros periódicos de distintas variables climáticas. Mientras que las dos primeras posibilidades son más propias del campo de la investigación la tercera alternativa es la más extendida en la práctica del riego. Pereira *et al.* (2010).

Según Hernández (2010), el análisis de la demanda de agua constituye uno de los aspectos básicos en la evaluación del uso del recurso hídrico en toda cuenca hidrográfica, que tenga como una de sus actividades principales la agricultura de regadío. Sin embargo, es una de las partes donde se cometen los mayores errores, debido fundamentalmente al desconocimiento que se tiene de los procesos evapotranspiratorios asociados a la estimación de las demandas hídricas de los cultivos, aunado al hecho de la falta de información de clima, suelo y fisiología de los cultivos.

Hernández (2010) también indica que, el punto de partida de todo cálculo de demanda, es el cálculo de los requerimientos de riego para cada uno de los cultivos a implantarse en el área regada, y estará en función del uso consuntivo de éstos. Del mismo modo, Hernández (2010), apunta que los requerimientos de riego se refieren a la cantidad de agua y al momento y período de su aplicación con la finalidad de compensar el déficit de humedad en el suelo durante el período vegetativo del cultivo considerado. Estos requerimientos o necesidades de riego quedan determinados por la evapotranspiración del cultivo menos todos los aportes de agua provenientes de diversas fuentes como lluvia o aportes superficiales o subterráneos.

De acuerdo a Razuri *et al.* (2008), el agua aplicada por métodos artificiales como el riego, no es totalmente efectiva, debiendo considerarse todas las pérdidas intencionales e inevitables, como percolación profunda, escorrentía superficial, arrastre por viento, entre otros. Generalmente la relación entre las necesidades netas de riego y las necesidades brutas se expresan como la eficiencia de aplicación del riego.

Por su parte, Vásquez (2019), indica que 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 definidos como aptos puedan variar, teniendo que considerar el cambio a nuevos cultivos que se adapten mejor a las nuevas condiciones climáticas del lugar.

2.3. Definición de términos

En este apartado se desarrollan algunos términos básicos para el entendimiento del tema de esta investigación:

Acuícludo: (del latín claudere = encerrar o cerrar) se define como aquella formación geológica que, conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Custodio y Llamas (1976).

Acuífero: es aquel estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros y/o grietas. Custodio y Llamas (1976).

De acuerdo con dichos autores, si se analiza detenidamente esta definición, (del latín aqua = agua y fero = llevar), se aprecia que el agua encerrada en una formación geológica cualquiera (gravas de un río, calizas muy agrietadas, areniscas porosas) puede estar ocupando ya sea los poros o vacíos intergranulares que presenta la misma, o bien las fracturas, diaclasas o grietas que también pueden darse.

Acuífugo: el término acuífugo (del latín fugere = huir) se refiere a aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo un macizo granítico que no esté fisurado o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación. Custodio y Llamas (1976).

Acuitardo: este término (del latín tardare = retardar) hace referencia a numerosas formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, pero, sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante en ciertos casos. Custodio y Llamas (1976).

www.bdigital.ula.ve

Capacidad de campo: representa la cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias, o sea la cantidad de agua remanente en el suelo cuando el drenaje descendente ha disminuido significativamente. FAO (2006).

Escorrentía: es la parte del agua caída sobre un suelo que al no poder absorberse circula por su superficie. *World Wildlife Fund for Nature (WWF)/Adena (2005)*.

Escurrimiento: es el agua que escurre sobre la superficie del terreno hasta los cauces, y es una fracción de la diferencia entre la humedad disponible para infiltrar y la infiltración real. Duque y Barrios. (1991).

Evapotranspiración: se considera como el paso del agua desde el suelo y/o a través de las plantas, a la atmósfera en forma de vapor. El valor de la evapotranspiración potencial comúnmente se toma como la evaporación medida en tina multiplicada por un cierto coeficiente. Duque y Barrios. (1991).

Forzamiento radiativo: la potencia de los elementos impulsores se cuantifica como forzamiento radiativo en unidades de vatios por metro cuadrado (W/m^2). El forzamiento radiativo es el cambio en el flujo de energía causado por un elemento impulsor y se calcula en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera. IPCC (2014).

Infiltración: es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del suelo hacia las capas más profundas. WWF/Adena (2005).

Percolación: es el agua del suelo que alcanza profundidades fuera del alcance de las raíces de las plantas. WWF/Adena (2005).

Precipitación: es un término general que abarca todas las formas de humedad que emanan de las nubes y caen a la tierra, es una entrada al sistema que generalmente es medida en algunos puntos de la cuenca a través de pluviómetros o pluviógrafos que dan la información de la ocurrencia y del valor puntual del fenómeno. Duque y Barrios. (1991).

Punto de marchitez permanente: es el contenido de humedad en el suelo en el cual las plantas se marchitan permanentemente. FAO (2006).

RCP 2.6: trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente $3 W/m^2$ antes de 2100 y posteriormente disminuye (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las emisiones sean constantes después de 2100). IPCC (2014).

RCP 4.5 y RCP 6.0: dos trayectorias de estabilización intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente $4,5 W/m^2$ y $6,0 W/m^2$ después de 2100 (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las concentraciones sean constantes después de 2150). IPCC (2014).

RCP 8.5: trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores $>8,5 W/m^2$ en 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las emisiones sean constantes después de 2100 y las concentraciones sean constantes después de 2250). IPCC (2014).

Trayectorias de concentración representativas (RCP) (*representative concentration pathways* (RCPs)): escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre. La palabra “representativa” significa que cada trayectoria de concentración ofrece uno de los muchos posibles escenarios que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo. La palabra trayectoria hace hincapié en que únicamente son de interés los niveles de concentración a largo plazo, pero también indica el camino seguido a lo largo del tiempo para llegar al resultado en cuestión. IPCC (2014).

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo de investigación

El presente trabajo se corresponde con una investigación de tipo descriptivo. Según Sabino (1987) las investigaciones descriptivas se proponen conocer grupos homogéneos de fenómenos utilizando criterios sistemáticos que permitan poner de manifiesto su estructura o comportamiento. No se ocupan, pues, de la verificación de hipótesis, sino de la descripción de hechos a partir de un criterio o modelo teórico definido previamente.

3.2. Descripción de la zona de estudio

3.2.1. Ubicación del área de estudio

Según Correa (2010) Portuguesa ocupa una superficie de 15200 km². Esta extensión representa 1.66% del territorio nacional y determina que, por su tamaño, la entidad ocupe el duodécimo lugar con respecto al resto de los estados venezolanos. En términos físico-naturales, una reducida zona situada al noroeste del estado corresponde a la provincia fisiográfica andina venezolana y, en marcado contraste, la mayor superficie de la entidad está ubicada en los llanos, específicamente los altos llanos occidentales.

El territorio de Portuguesa tiene como límites: al norte, 180 kilómetros con el estado Lara; al este, 160 kilómetros con el estado Cojedes; al sur, 260 kilómetros con el estado Barinas; y al oeste, 40 kilómetros con el estado Trujillo. Existen, asimismo, tres áreas con superposición de límites entre Portuguesa y los estados vecinos. Un primer sector de 311.83 km² entre Portuguesa y Barinas; una segunda zona en discusión entre Portuguesa y Lara, cuya superficie abarca 202.55 km², y una tercera extensión de 187.43 km² entre Portuguesa y Cojedes. Correa (2010).

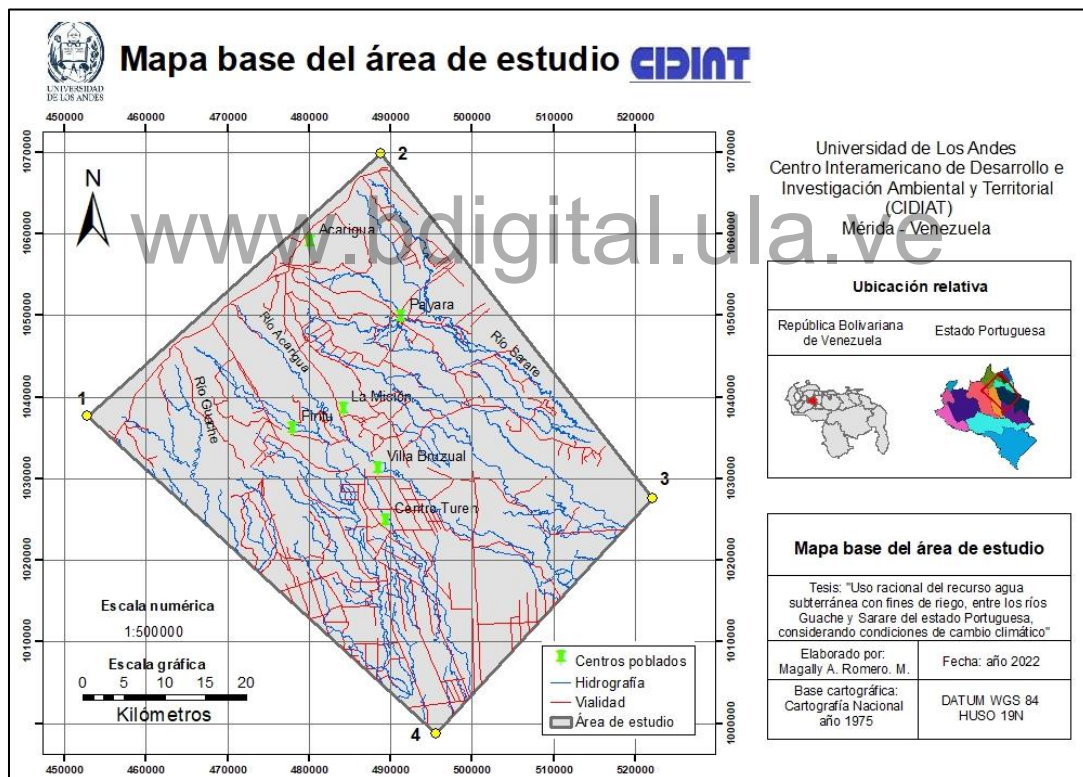
La organización político-territorial actual del estado comprende 14 municipios: Agua Blanca, Araure, Esteller, Guanare, Guanarito, Monseñor José Vicente de Unda, Ospino, Páez, Papelón, San Genaro de Boconoíto, San Rafael de Onoto, Santa Rosalía, Sucre y Turén. Es importante señalar que, la capital del estado es Guanare.

La zona de estudio tiene un área total de 2427.096 km² y se encuentra ubicada dentro de los Llanos del Orinoco, específicamente en los Llanos Occidentales del estado Portuguesa, entre los ríos Guache y Sarare; con las siguientes coordenadas UTM (ver la Tabla 3.1 y la Figura 3.1):

Tabla 3.1. Coordenadas del área de estudio

Coordenadas UTM del área de estudio		
Punto de control	Norte (m)	Este (m)
1	1037724.62	452845.23
2	1069910.37	488756.32
3	1027564.61	522060.37
4	998777.88	495601.98

Fuente: Propia.



Fuente: Romero *et al.* (2022).

Figura 3.1. Ubicación del área de estudio.

3.2.2. Caracterización físico-natural

3.2.2.1. Vegetación

La vegetación dominante es de sabana, pero también se encuentran bosques de galería a lo largo de los ríos, y densas selvas en el piedemonte andino. Allí abundan las maderas finas que constituyen una enorme fuente de riqueza, representadas por el chaparro, la caoba, el salvio, el eucalipto, las tecas y los pinos. Instituto Nacional de Estadística (2014).

Asimismo, el Instituto Nacional de Estadística (2014) señala que, en las estribaciones andinas del estado las comunidades forestales son variables: bosques primarios de montaña, matorrales de montañas y espinares. En el piedemonte y los llanos altos, se encuentran bosques mixtos, semidecuidos, aunque gran parte se halla bajo cultivo o pastos. En los llanos bajos dominan los bosques y las sabanas, tanto las secas (bancos) como las de estero. Las sabanas secas se encuentran en áreas ligeramente más altas con micro relieve convexo y se mantienen secas durante gran parte del año. Las sabanas de estero son cubetas aluviales de micro relieve cóncavo, que se inundan en la época de lluvia.

3.2.2.2. Clima www.bdigital.ula.ve

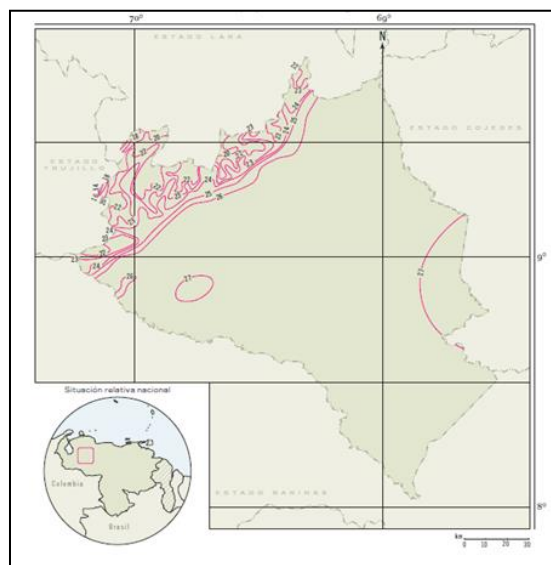
La altura del relieve es el componente de mayor influencia sobre los rasgos climáticos locales de Portuguesa. De acuerdo con las categorías de Koeppen, el clima del estado comprende las siguientes categorías: de sabanas y bosques tropófilos húmedos, de sabanas y bosques tropófilos subhúmedos y de sabanas y bosques tropófilos semisecos. La altitud aproximada de los llanos, entre 0 y 200 msnm, determina su ubicación en la zona cálida, la cual se extiende desde 0 hasta 800 msnm. Correa (2010).

El clima del estado Portuguesa es relativamente homogéneo, donde la temperatura promedio oscila entre los 24^o y 28^oC. (ver la Figura 3.2), siendo ésta regulada por los vientos provenientes del golfo de Venezuela y los alisios que remontan los Llanos, los cuales producen áreas de nubosidad y lluvias torrenciales frecuentes. Las precipitaciones en las zonas de montañas varían entre los 1400 mm y 2000 mm y van disminuyendo notoriamente hacia las grandes extensiones planas que ocupan casi todo el estado. Instituto Nacional de Estadística (2014).

Según Strebin y Mazzei (1991), la precipitación media anual tiene un rango de variación importante en los diferentes municipios que conforman el estado. Para los municipios Turén, Píritu y Santa Rosalía estimaron un promedio de precipitación anual de 1452.3 mm; para los municipios Páez, Araure, Agua Blanca y San Rafael de Onoto un promedio anual de 1570.1 mm; para los municipios Guanare y parte de Sucre un promedio anual de 1617.7 mm; para los municipios Papelón y Guanarito un promedio anual de 1520.1 mm; para el municipio San Genaro de Boconoito un promedio anual de 1562.4 mm y para los municipios Unda y parte de Sucre un promedio anual de 1930 mm de precipitación. En la Figura 3.3 se observa el comportamiento general de la precipitación media anual en el estado.

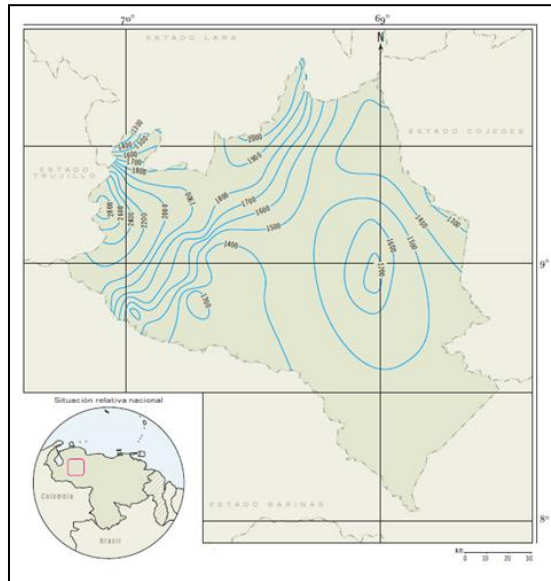
Strebin y Mazzei (1991) también señalan que, el periodo húmedo va de mayo a octubre, cuando cae aproximadamente el 85% de la precipitación anual, y un periodo seco de diciembre a marzo. Noviembre y abril son transicionales. Según Ramírez (2005), el promedio mensual de precipitación durante el período seco es de 60 mm.

Por otra parte, la evaporación media anual varía desde 1600 hasta 1900 mm. Durante el año se registra una evaporación media mensual de 160 mm, con una mínima de 110 mm en junio y una máxima de 280 mm en abril. Cabrera (1980).



Fuente: Martínez (s/p 2003) citado en Correa (2010).

Figura 3.2. Distribución de isotermas anuales (°C) en el estado Portuguesa.



Fuente: Martínez (s/p 2003) citado en Correa (2010).

Figura 3.3. Distribución de isoyetas anuales (mm) en el estado Portuguesa.

3.2.2.3. Relieve

www.bdigital.ula.ve

De acuerdo a Correa (2010) el estado Portuguesa se encuentra emplazado entre dos grandes unidades físico-naturales o provincias fisiográficas: el sistema de Los Andes, específicamente en la región natural Cordillera de Mérida, y los Llanos, en la región natural de los Llanos occidentales. Estas regiones contienen diversos tipos de paisaje, que se manifiestan a través de rasgos distintivos.

Los paisajes naturales del estado comprenden las siguientes unidades: en la provincia fisiográfica de Los Andes, emplazados en la región natural de la Cordillera de Mérida se destacan: las montañas bajas (10.28%), las montañas altas (0.29%), el piedemonte de colinas (10.22%), el piedemonte plano y ondulado (4.46%), y los valles bajos (3.84%). MARNR-FUDECO (1983) en Correa (2010).

En contexto, Correa (2010) señala que, de la provincia fisiográfica de los Llanos, dentro de las regiones naturales de altos llanos y bajos llanos occidentales se distinguen las planicies de explayamiento (39.33%), las planicies de desborde (19.42%) y las planicies deltaicas

(12.16%). El predominio de las planicies o llanuras es evidente, ya que ocupan 70.91% de la superficie total de la entidad.

Según Strebin y Mazzei (1991) en el extremo norte del estado se presentan áreas montañosas que forman parte de la Serranía del Interior, cuyas alturas máximas se encuentran entre 1800 y 2000 m. Al sur de las áreas montañosas generalmente entre estas y la carretera San Carlos Acarigua-Guanare-Puente Páez, se presentan extensiones de anchura muy variable, hasta de 30 Km., de cerros bajos comúnmente llamadas piedemonte, normalmente entre 150 y 450 msnm. Son de topografía muy irregular y disectadas por numerosas quebradas donde corre agua solamente al llover. Son utilizadas para pastoreo. Al sur y sureste de esta formación se extienden los propios y amplios "Llanos Altos Occidentales", con elevaciones entre los 100 y 150 msnm, tienen escasa pendiente cuya continuidad se encuentra interrumpida por numerosos cauces de agua, tanto permanente como intermitente. En estas tierras se encuentra la mayor parte de la población del estado y la mayoría de la agricultura. En la parte sur del estado por debajo de 100 msnm se presentan los "Llanos Bajos", en este paisaje dominan las unidades fisiográficas denominadas conjuntamente "bajíos y esteros" las cuales tienen muy poco desnivel y se inundan anualmente durante las épocas de lluvias, siendo las inundaciones en los esteros mayores que en los bajíos.

3.2.2.4. Hidrografía

El recurso hídrico del estado es abundante, la zona montañosa es un gran reservorio de fuentes de agua, que pertenecen a la cuenca del río Orinoco. Entre los ríos más importantes destacan: Portuguesa, Guanare, Acarigua, Cojedes, Guache, Ospino, Tucupido, Morador, Bucaral, María, Sarare, Saguáz y Boconó, éste último forma parte del límite oeste del estado Portuguesa con el estado Barinas y desemboca en el río Guanare.

Todos estos ríos durante el período seco presentan un gasto mínimo variando desde pocos litros por segundo hasta unos pocos metros cúbicos, incrementando estos gastos durante el período lluvioso a varias decenas de metros cúbicos, y en el caso de los ríos Boconó, Guanare, Acarigua y Cojedes, hasta varios centenares de metros cúbicos. Strebin y Mazzei (1991).

En su más extensa expresión geográfica, la red hidrográfica de Portuguesa corresponde a la vertiente atlántica, provincia del Orinoco, la cual incluye la cuenca del río Apure y sus tributarios, los ríos Portuguesa, Guanare y Boconó. El sistema de drenaje de los altos llanos en la entidad presenta una dirección sureste, en perspectiva ortogonal a las montañas andinas, mientras que en los llanos bajos se distingue un patrón paralelo, que durante el período lluvioso adquiere tal nivel de complejidad que impide la comunicación terrestre. Correa (2010).

Los ríos Acarigua, Guanare, Boconó, Tucupido y Portuguesa forman parte de la cuenca del río Orinoco, este último (río Portuguesa), atraviesa el estado y recoge las aguas de todos los ríos excepto el río Sarare, que en su parte alta recibe los nombres de Barquisimeto y Turbio. La mayoría de los afluentes son de régimen uniforme, al igual que la presencia de numerosas Lagunas y Esteros cuya superficie aumenta o disminuye de manera ostensible de un período lluvioso a otro menor. Instituto Nacional de Estadística (2014).

La cuenca del río Guanare se encuentra ubicada en la parte occidental de Venezuela; se forma en la unión de los ríos Chabasquén y Saguáz; tiene por afluentes los ríos Anus, Tucupido y Boconó. Rivero (1998).

Rivero (1998), indica que, la cuenca del río Acarigua nace en el estado Lara en la confluencia de los ríos Yacambú y Bucaral. Al desplazarse en sentido Norte- Sur y atravesar la región, sirve de drenaje natural a las tierras altas aproximadamente hasta Villa Bruzual, ciudad capital del municipio Turén. A la altura del puente de la carretera nacional Guanare – Acarigua, el río se muestra bastante trezado, luego en la zona baja se hace muy meandroso y tiende a desbordarse e inundar las áreas adyacentes.

Asimismo, señala que la cuenca del río Portuguesa nace en el cerro Curumato, a 2245 m.s.n.m., en el estado Lara. Tiene aproximadamente 390 km de curso y desemboca en el río Apure, casi frente a la población de San Fernando. Sus afluentes son: Las Marías, el Morador que recibe aguas de los ríos Toco y Ospino; el río Guache con sus afluentes el Aro y Yauró; el río Acarigua alimentado por el Yacambú que viene del estado Lara y el río Claro.

El recurso hídrico constituye una de las ventajas competitivas relevantes de la entidad. Esta condición se manifiesta, entre otros hechos, en la existencia de los embalses Boconó-

Tucupido o también conocido como La Coromoto y Las Majaguas, destinados al abastecimiento de agua para consumo humano, generación hidroeléctrica, riego y control de inundaciones. Correa (2010).

3.2.2.5. Geología

Según Cabrera (1980), la Cordillera Andina formada por rocas sedimentarias del Cretáceo Inferior al Pleistoceno bordea toda la zona, que se caracteriza por haberse originado a partir de depósitos aluviales recientes. Estos depósitos están compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas, depositadas en diferentes estratos, con valores de permeabilidad variable. A los lados de los ríos y al inicio del piedemonte se detectan zonas de altas transmisividades, debido a que existen grandes acumulaciones de gravas gruesas y arena. En las zonas más bajas, con pendiente más suave, material más fino y frecuentes inundaciones, ocurre lo contrario.

La estratigrafía de la región de Portuguesa comprende las siguientes Formaciones:

Formación Río Guache: según el Ministerio de Minas e Hidrocarburos (1970) esta Formación es de edad Maestrichtiense – Paleoceno, y consiste en una secuencia de flysch compuesta de capas de areniscas y lutitas, algunos conglomerados líticos y muy escasas capas delgadas de caliza. Las areniscas son líticas, de grano medio a muy fino; las lutitas son silíceas, bien estratificadas, astillosas y de colores oscuros; los conglomerados líticos son lenticulares, de colores grises, con cantos de rocas ígneas y metamórficas, areniscas, chert y calizas, en una matriz arcillo-arenosa.

Aflora en el piedemonte andino de Lara y Portuguesa. Suprayace concordante sobre la Formación Barquisimeto pero está sobrecorrida por encima de rocas del Eoceno y más jóvenes; en contacto de falla con la Formación Río Yuca, el espesor promedio es de 400 metros. Bongiorno y Torres (1998) en Ramírez (2005).

Formación Sabaneta: consiste en cuñas delgadas y abruptas de rocas clásticas de material terrígeno, continental. La litología predominante muestra una secuencia de areniscas cuarzosas, gruesas, de color gris a gris verdoso que gradan hacia arriba a una intercalación de limolitas y areniscas de color rojo a violeta. La facie marginal sur está bien representada

en la sección del curso inferior del río Acarigua, donde la Formación no presenta conglomerado basal y en ella se distinguen dos intervalos. El intervalo inferior muestra predominio de areniscas macizas, de grano grueso a conglomeráticas, con estratificación cruzada, de colores grises y pardo amarillento, intercaladas entre las areniscas se encuentran capas delgadas de limolita gris, micácea, finamente arenosa y localmente carbonácea. Hacia arriba aparecen en la sección capas de conglomerados intercalados con areniscas de gran espesor, con gránulos aislados, enhiladas y bolsones. En el intervalo superior la textura de las rocas es más fina y se intercalan areniscas pardo rojizas con limolitas rojo violáceas en una sección donde las limolitas se van haciendo progresivamente predominantes y se intercalan con lutitas frecuentemente limosas, de color gris verdoso, con bandas de meteorización rojo violácea. En cuanto al ambiente sedimentario, no existe duda acerca de su carácter continental. Precisamente en la sección sur (río Acarigua), los caracteres litológicos son indicativos de canales divagantes de ríos entrelazados, desarrollados en grandes abanicos aluviales. Allí, las capas rojas de la Formación pudieran representar sedimentos de la llanura de inundación con mesas de aguas profundas en donde las condiciones oxidantes fueron dominantes. Correa (2010).

Formación Pagüey: esta Formación de edad Eoceno medio tardío, consiste en areniscas ferruginosas, carbonáceas y ocasionalmente calcáreas, alternadas con lutitas y limolitas fosilíferas, en estratos irregulares. Aflora al noreste de la cuenca de Barinas. Es suprayacente a la Formación Masparrito, o en su ausencia a la Formación Gobernador. Infrayace y está en contacto angular con la Formación Parángula. Ramírez (2005).

Formación Palmarito: de origen carbonífero a pérmico, es una secuencia de Lutitas principalmente marinas, limos, arena y margas, que gradan hacia arriba a calizas marinas. La Formación está dividida en un miembro inferior clástico y un miembro superior de calizas. El miembro clástico inferior comienza con una secuencia arenosa a limosa, con restos de plantas y lechos delgados de carbón en el tercio inferior, las areniscas se hacen calcáreas hacia arriba y hacia la parte media del miembro o algo más arriba, aparecen fósiles marinos. Siguen lutitas y lutitas limosas calcáreas de color gris oscuro, con algunos lechos de margas arenosas de color negro y algunas capas de calizas fosilíferas. El miembro superior de calizas consiste predominantemente de calizas duras a veces cristalinas de color gris oscuro,

en capas gruesas a medianas, con delgadas intercalaciones de margas fosilíferas. Correa (2010).

Formación Parángula: esta Formación del Mioceno inferior- medio, aflora como una faja en los contrafuertes meridionales andinos, desde el río Portuguesa hasta el río Caparo. De origen continental se compone de conglomerados lenticulares de grano grueso, color gris, verde a pardo; areniscas de grano fino en estratos macizos con estratificación cruzada; limolitas y lodolitas abigarradas en tonos rojos, violeta y pardo. Es suprayacente a la Formación Pagüey en discordancia angular marcada e infrayace a la Formación Río Yuca, también en forma discordante. Ramírez (2005).

Formación Río Yuca: esta Formación corresponde al Mio-plioceno. Al igual que la Formación Parángula es eminentemente continental, compuesta principalmente de conglomerados de grano grueso, areniscas macizas, limolitas y arcilitas; localmente se presenta algunas calizas. El color verdoso permite diferenciarla de la Formación Parángula infrayacente (Araujo, 1980 en Rivero, 1998). La unidad aflora en una amplia faja a lo largo del flanco sureste de Los Andes, limitada al norte por su contacto con la Formación Parángula y al sur con la Formación Guanapa o sedimentos recientes. Ministerio de Minas e Hidrocarburos (1970).

Formación Guanapa: de edad pleistocena, aflora en la región piemontina de Los Andes, al noreste de la cuenca Barinas. Está compuesta por conglomerados, arenas y arcillas en estratos macizos y con estratificación cruzada, mal consolidados con pobre escogimiento; de color gris claro a pardo, gris oscuro y verde. Estos sedimentos forman las mesas y terrazas en la faja piemontina. Ramírez (2005).

Grupo Iglesias: unidad heterogénea de rocas sedimentarias e ígneas intensamente metamorfizadas si se las compara con el resto de las unidades de Los Andes venezolanos. Se distinguen tres unidades cuyos contactos son de aparente concordancia: 1. Gneis bandeado de la Mitisús (posiblemente equivalente a la Formación Sierra Nevada): gneises y esquistos cuarzo muscovítico- biotíticos, biotítico-almandínicos, silimanítico- almandínico-biotíticos y homabléndico-plagioclásico - biotíticos, anfibolitas, pegmatitas y aplitas. 2. Esquistos y cuarcitas de El Alambique (posiblemente equivalente a la Formación Bella Vista): serie de capas alternas de cuarcitas laminadas y esquistos micáceos complejamente

plegadas. 3. Gneis granítico La Raya: gneis de grano fino a grueso que contiene masas tabulares de anfibolita, diques de roca ígnea, granulita piroxénica y andesita porfídica en contacto de falla con la Formación Cerro Azul suprayacente. Correa (2010).

3.2.2.6. Suelos

Los suelos emplazados en los paisajes de montaña del estado Portuguesa corresponden a la denominada región fisiográfica Andes y Perijá. Esta ubicación determina una significativa variedad de factores de formación, los cuales generan características edáficas muy diferentes que incluyen tanto suelos profundos y con alto contenido de materia orgánica como suelos superficiales y pedregosos. En este sentido, el gran grupo Dystrudepts representa el suelo de referencia, con una profundidad moderada (50 a 100 cm), textura entre media y moderadamente pedregosa, contenido variable de medio a alto de materia orgánica y, de bien a excesivamente bien drenado. Correa (2010).

Correa (2010) también señala que, los suelos de las llanuras de Portuguesa corresponden a la región fisiográfica de los llanos occidentales. En términos generales, se trata de suelos de áreas planas y bajas con combinaciones de relieve de origen fluvial. Los materiales parentales están constituidos por sedimentos fluviales limosos y arcillosos, con contenidos variables de arena fina, expresados en capas superpuestas con estructuras lenticulares de tipo horizontal.

El suelo de referencia de los llanos portugueses clasifica como Haplustepts. Éste es un suelo profundo (más de 150 cm), con desarrollo medio y escasa estabilidad estructural, moderada cantidad de materia orgánica en los horizontes superficiales, alta saturación de bases, lixiviación pobre y buena fertilidad, donde no se observa incremento del contenido de arcilla con la profundidad. Correa (2010).

3.2.2.7. Recursos protegidos

Una porción significativa del territorio del estado Portuguesa corresponde a alguna categoría de área bajo régimen de administración especial (ABRAE). En la entidad se identifica un sistema formado por parques nacionales (El Guache, General Cruz Carrillo, Terepaima, Yacambú y Dinira), refugios de fauna silvestre (Estero de Chiriguare), áreas boscosas bajo

protección (Botucal, Delgadito, Río Guanare Viejo, El Clavo y Piedemonte Portuguesa), área rural de desarrollo (municipios Guanare y Guanarito), reserva forestal (Turén), zonas protectoras, reserva nacional hidráulica (Guanare y Guanarito) y sitio de patrimonio histórico cultural o arqueológico (Templo Votivo de Nuestra Señora de Coromoto), cuyos objetivos generales están dirigidos a la ordenación territorial, el desarrollo sustentable y la conservación de la biodiversidad. Modificado de Correa (2010).

3.2.3. Caracterización socio-económica

3.2.3.1. Aspectos históricos

Guanare fue fundada en 1591. En 1786, cuando se creó la Comandancia General de Barinas, formó parte de ella, quedando comprendida en la Provincia de Caracas. En 1824, los cantones de Guanare, Ospino y Araure fueron separados de la Provincia de Caracas y reincorporados a Barinas, la cual había adquirido el rango de Provincia. En 1851, se creó la Provincia de Portuguesa con los cantones de Guanare, Araure, Guanarito y Ospino. En abril de 1881, Portuguesa, Cojedes y Zamora se fusionaron en el Gran Estado Sur de Occidente; esta unión duró hasta 1909, cuando fue creado el Estado Portuguesa. En 1927 Acarigua asumió el papel de capital, pero en 1937 volvió a ser designada Guanare, que ha permanecido como capital hasta nuestros días. Instituto Nacional de Estadística (2014).

3.2.3.2. Población

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística (2014) en el año 2011 la población residente en el estado Portuguesa fue de 876496 personas, 150756 habitantes más que los registrados en el Censo 2001. Esto representa un crecimiento relativo de 20.8%, y una tasa de crecimiento geométrica interanual de 1.9%. Si la cifra registrada por el Censo 2011 es comparada con la de 1961, resulta que el volumen de población se ha incrementado 4 veces, al pasar de 203707 a 876496 habitantes.

En la Tabla 3.2 se observa la tendencia creciente de la población y de la densidad del estado Portuguesa de acuerdo con los catorce censos realizados anteriormente, los cuales abarcan un período de 138 años.

Tabla 3.2. Tendencia de la población y la densidad del estado Portuguesa

Evolución de la población del estado Portuguesa y su densidad		
Censo	Población	Densidad* (hab/km ²)
1873 (7nov.)	79934	5.3
1881 (27 abr.)	95814	6.3
1891 (15 ene.)	96045	6.3
1920 (1 ene.)	52549	3.5
1926 (31 ene.)	58721	3.9
1936 (26 dic.)	71675	4.7
1941 (7 dic.)	87151	5.7
1950 (26 nov.)	122153	8.0
1961 (26 feb.)	203707	13.4
1971 (2 nov.)	297047	19.5
1981 (20 oct.)	424984	28.0
1990 (21 oct.)	576435	37.9
2001 (22 oct.)	725740	47.7
2011 (30 oct.)	876496	57.7

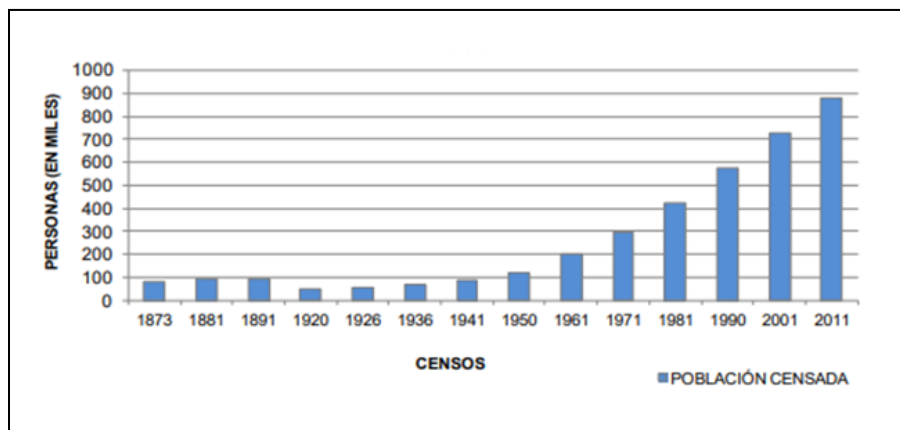
*La superficie del estado es de 15200 km²

Fuente: Datos de Instituto Nacional de Estadística (2014).

Además, tal como lo señala el Instituto Nacional de Estadística (2014), de la población nacida en Venezuela residente en el estado Portuguesa para el Censo 2011, 0.1% se autoreconoció perteneciente a algún Pueblo Indígena y la distribución por sexo de esta población es 64.0% hombres y 36.0% mujeres. Instituto Nacional de Estadística (2014).

La densidad demográfica del estado Portuguesa tiende a incrementarse a medida que pasa el tiempo debido al aumento de la población. Es así que entre 1961 y 2011, la densidad de la entidad pasa de 13.4 a 57.7 habitantes por km².

En la Figura 3.4 se observa un gráfico con la población total censada entre los años 1873-2011.



Fuente: Instituto Nacional de Estadística (2014).

Figura 3.4. Población total censada del estado Portuguesa. Censos 1873-2011.

3.2.3.3. Educación

En materia de educación superior el estado cuenta con la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora (UNELLEZ), el Instituto Tecnológico de Portuguesa y la extensión de las universidades de Mérida y Carabobo. También se cuenta con el moderno centro de educación y conservación ambiental “Ricardo Montilla” el cual está llamado a dictar pautas en materia de conservación de los recursos naturales renovables y medio ambiente. Strebin y Mazzei (1991). Correa (2010), señala que de acuerdo con los criterios usados durante el levantamiento censal de 2001, las características educativas de la población de Portuguesa se resumen en los siguientes datos:

- 88.81% de la población de 10 años y más es alfabeta. Los municipios Araure (91.6%), Guanare (90.0%) y Páez (93.0%) presentan un indicador superior al estatal. El nivel más bajo corresponde a Papelón, con 79.6% de población que reporta saber leer y escribir.
- 36.10% de la población de 3 años o más asiste a un centro educativo. La totalidad de los municipios presenta una tendencia similar a excepción de Agua Blanca, donde se registra 85.7% de asistencia. Este rasgo es particularmente significativo en términos de calidad de vida y potencial del recurso humano de la entidad.

- 38.5% de la población mayor de 15 años señala haber completado algún curso de educación superior. Este valor expresa los máximos niveles educativos que alcanza la población. Por encima del referente estatal, los municipios Sucre (49.6%), Unda (61.9%) y Guanare (44.1%) registran mejores resultados. Nótese el hecho de que Guanare es sede de la UNELLEZ. En el año escolar 2003–2004 se han matriculado 33023 niños en educación preescolar, 169459 muchachos en educación básica y 16722 en educación media.

3.2.3.4. Actividades económicas

El estado Portuguesa comprende, de acuerdo con MARNR-Fudeco (1983), 5 subregiones económicas: Acarigua-Araure, 4471 km²; Ospino, 1671 km²; Guanare, 5174 km²; Biscucuy, 1043 km²; y Guanarito, 2841 km². Según la Alcaldía del municipio Guanare, la agricultura constituye la actividad económica de origen privado más importante del estado (26%), junto con una proporción destacada del sector terciario (particularmente servicios) (59%) y una participación modesta del sector industrial (15%). Correa (2010).

Actividades agropecuarias: La actividad agrícola es el eje de la economía de Portuguesa. El subsector vegetal contribuye en un 80% a la producción agrícola, con predominio de cereales (57%), café (26%), oleaginosas (13%) y textiles (4%). Considerada la producción agrícola de Venezuela, Portuguesa aporta los valores relativos de los siguientes rubros: 57% de arroz, 40% de maíz, 6.4% de sorgo, 78% de ajonjolí, 31.7% de algodón, 20% de caña de azúcar y 13.1% de café. Correa (2010).

Desde el punto de vista espacial, Correa (2010) señala que, la agricultura se concentra en las áreas incorporadas al proceso de modernización agrícola, destacándose las zonas de producción Turén I (2500 km²) y Turén II (540 km²), Guanare-Masparro (1690 km²), Ospino (1400 km²), municipios Páez (Acarigua) y Araure (800 km²) y Las Majaguas (300 km²). Las zonas altas, por sus características fisiográficas, están aprovechadas bajo sistemas de producción tradicionales. La extensión total de estas áreas productivas es de 9030 km². Por su parte, la agricultura vegetal está complementada con agricultura animal que incluye ganadería de leche y carne, así como también producción de ganado porcino, caprino y ovino.

Producción pesquera: La pesca representa una potencialidad de desarrollo importante para el estado e incluso para la región. Requiere, sin embargo, prácticas de manejo sostenible, adaptadas a las condiciones ecológicas de los lugares y las especies, respuestas técnicas apropiadas, mejoramiento de la infraestructura y muy especialmente, aplicación de un concepto de gestión ambiental integral que incluya aspectos tales como conservación de masas boscosas, protección de cuencas hidrográficas altas y prevención y control de la contaminación de las aguas superficiales. Correa (2010).

Hidrocarburos y minería: según Correa (2010) no existe realmente una producción de hidrocarburos en Portuguesa; las actividades y concesiones han estado restringidas a la fase exploratoria, a partir de 1990, en especial para la identificación y evaluación de yacimientos de gas libre, sin resultados satisfactorios, dentro de las áreas correspondientes al proyecto Flanco Sur Andino (1994 –1996), convenios operativos (1996 –1997) y licencias para explotación de gas libre (2000). Adicional a esto, sólo existe la presencia del oleoducto San Silvestre-El Palito, que atraviesa el estado en sentido suroeste-noreste y permite transportar el crudo producido en Barinas hasta la Refinería El Palito, en el estado Carabobo. Correa (2010). En el sector minería existen explotaciones comerciales de arenas y gravas, arena amarilla y piedra bruta (calizas y areniscas calcáreas) en las cercanías de los ríos Guanare, Acarigua, Las Marías y Guache.

Aprovechamiento hidráulico e hidroeléctrico: esta actividad está representada por una importante infraestructura que incluye embalses, sitios de presa, subestaciones hidroeléctricas, acueductos, sistemas de riego y tomas de aguas subterráneas. Correa (2010).

De acuerdo con Correa (2010), Río Guanare, Cojedes-Sarare o Las Majaguas y Tierra Buena representan los sistemas de riego más importantes del estado. Los sistemas de acueductos urbanos de Portuguesa son: Guanare (producción de 800 l/s), Acarigua-Araure (850 l/s), Villa Bruzual (245.7 l/s) y Ospino (245.7 l/s). De igual manera se distinguen 32 acueductos rurales asociados con un nivel de captación de 945 l/s.

Producción industrial y actividades terciarias: la industria de Portuguesa representa aproximadamente 15% del escenario económico global de la entidad, lo cual significa una

participación mucho menor que la agricultura (26%) y los servicios (59%). Destacan las zonas industriales emplazadas en los municipios Araure, Páez y Guanare. Su número también es relevante en los municipios de Turén, Agua Blanca, San Rafael de Onoto, Esteller, Ospino, Sucre, San Genaro de Boconoíto y Guanarito. Correa (2010).

Las actividades terciarias, como lo señala Correa (2010), se concentran en ciudades como Guanare y Acarigua, a través de actividades comerciales, finanzas y servicios. El componente terciario sobrepasa en importancia al sector secundario, pues absorbe aproximadamente 59% de la mano de obra activa.

Strebin y Mazzei (1991) señalan que la industria azucarera ha tenido un aumento creciente en los últimos años, con la construcción de cuatro modernos centrales azucareros. Central Majaguas, Portuguesa, Guanare y Toliman, también existen numerosos aserraderos y plantas beneficiadoras de arroz. Otras industrias incluyen demostadoras de algodón, alfarería, fábricas de productos de concretos. Artículos de deporte, productos químicos y de aceite comestible, así como ensambladoras de maquinarias agrícolas. En el área turística y recreativa portuguesa cuenta con el templo votivo Nuestra Señora de Coromoto, la Basílica, los embalses Boconó, Tucupido y las Majaguas. Tiene aeropuertos en las ciudades de Acarigua y Guanare, así como las vías férreas Acarigua-Yaritagua-Puerto Cabello y en construcción Acarigua.

3.2.3.5. Potencial agrícola y capacidad de uso de las tierras

La disponibilidad de tierras agrícolas constituye una de las ventajas competitivas más importantes de Portuguesa. La conjunción de áreas de pendiente plana con suelos de buena calidad y la disponibilidad de agua determinan estas condiciones, especialmente en las llanuras. Correa (2010). De acuerdo con la información levantada y sintetizada por MARNR-Fudeco en 1983, el estado Portuguesa cuenta con 2964 km² de tierras de muy alto potencial agrícola, 2021 km² de tierras de alto potencial y 3011.12 km² de moderado potencial, lo cual representa aproximadamente 52.6% de la superficie total de la entidad. En el contexto nacional, ello significa aproximadamente 13% del total de tierras aptas para uso agrícola vegetal del país y 2% de zonas susceptibles de ser utilizadas para actividades agropecuarias. Strebin y Mazzei (1991).

Desde la perspectiva de Marín (1999) en Correa (2010), en Portuguesa sobresale la vocación de usos combinados (agricultura y ganadería) asociada con una amplia extensión de las tierras llaneras, así como la pecuaria para áreas específicas de este mismo paisaje y el uso de vegetación natural protectora en zonas montañosas y piedemontinas.

Según Correa (2010), si las tierras de Portuguesa se clasifican por capacidad de uso, es posible señalar que, en términos generales, en las montañas y el piedemonte predominan las combinaciones de tierras clases VII + VI, con una reducida pero importante presencia de suelos clase I en los valles intramontanos. En los llanos o planicies se distinguen las combinaciones asociadas con las clases III y VI, aun cuando destacan también unos 21.5 km² de tierras clase I y una superficie de 4239.8 km² de tierras clase II.

3.2.3.6. Vialidad y transporte

Los tres principales ejes viales de Portuguesa son la autopista José Antonio Páez, que comunica las poblaciones de Barinas-Guanare-Ospino-San Carlos y desde allí con la autopista Regional del Centro; la troncal 5, vía tradicional de vinculación entre Guanare-Barinas y San Cristóbal; y la carretera troncal nacional 4, entre Acarigua y Barquisimeto. La longitud total de las vías estatales representa 5402 kilómetros lineales, de los cuales 1022 km corresponden a vías pavimentadas (19%), 3261 km son carreteras engrazonadas (60.36%) y 1119 km son vías de tierra (21%). Correa (2010). Igualmente, destaca la presencia del Aeropuerto de Acarigua, como componente del sistema de cobertura aérea comercial nacional, con conexiones directas con el Aeropuerto de Maiquetía, que sirve a la ciudad de Caracas y con servicio de aeronaves privadas. Correa (2010).

3.3. Técnicas, procesamiento y análisis de datos

La recopilación, procesamiento e interpretación de los datos requeridos para lograr los objetivos planteados en esta investigación se llevó a cabo en tres etapas de acuerdo con el esquema metodológico de la Figura 3.5. La primera etapa comprendió la recopilación de información bibliográfica y cartográfica, la segunda etapa consistió en el procesamiento de la información y la tercera etapa se basó en la interpretación de los datos. Cada una de estas etapas comprendió a su vez una serie de actividades necesarias para alcanzar los objetivos propuestos. A continuación, se describen cada una de ellas.

3.3.1. Recopilación de información bibliográfica y cartográfica

Esta etapa consistió en la revisión y recopilación de información bibliográfica y cartográfica relacionada con la temática de estudio. En efecto, se buscaron y consultaron distintas fuentes bibliográficas como informes, artículos de investigación, tesis, publicaciones y trabajos previos que aportaran información valiosa para el estudio a realizar. Se buscaron las cartas topográficas correspondientes al área de estudio para elaborar el mapa base. Igualmente, se recopiló información hidroclimática, información de los pozos localizados en el área de estudio e información relacionada con los cultivos representativos del área de estudio.

La información básica del área de estudio comprendió:

- Hojas cartográficas 6344; 6444; 6343; 6443 y 6345 a escala 1:100.000, de la dirección de Cartografía Nacional del Ministerio de Obras Públicas.
- Información técnica (coordenadas UTM, litología, caudales, etc.) relacionada con la base de datos de los pozos de agua subterránea involucrados en el estudio. Dicha base de datos corresponde al Sistema de Información Geográfica del Atlas Hidrogeológico de Venezuela (SIGATLAS).
- Información acerca de las estaciones meteorológicas de precipitación y evaporación presentes dentro y en los alrededores de la cuenca hidrográfica con la cual se trabajaría. Asimismo, información de las estaciones hidrométricas existentes.
- Información relevante sobre la caracterización físico-natural y socio-económica del estado Portuguesa que permitiera hacer un diagnóstico general de la zona estudiada.
- Información acerca de los cultivos y patrones de siembra históricos en el estado Portuguesa.



Fuente: Propia.

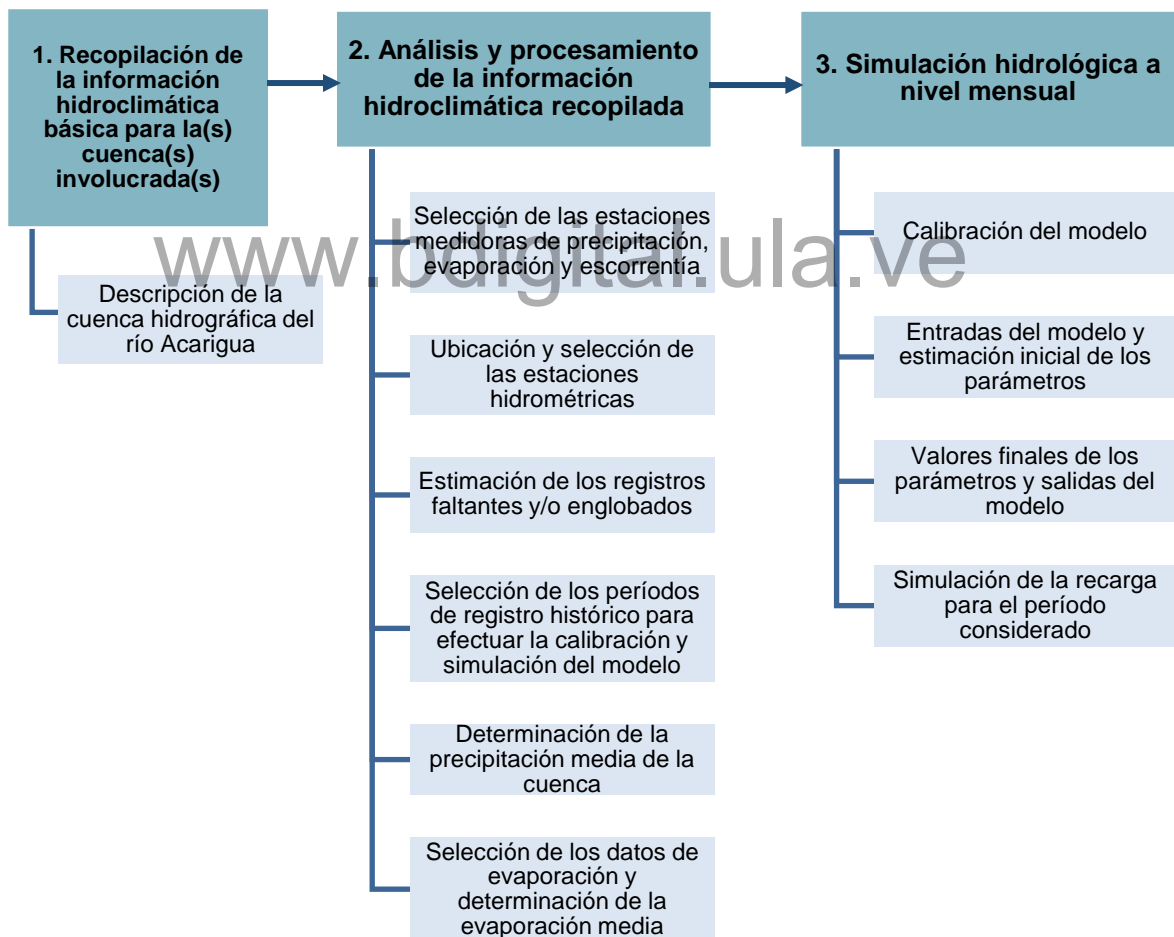
Figura 3.5. Esquema metodológico.

3.3.2. Procesamiento de la información

A continuación se describen las actividades correspondientes al procesamiento de la información en esta investigación:

a) Delimitación del área de estudio: toda la información cartográfica básica recopilada en relación al área de estudio se procesó y digitalizó mediante el programa ArcGis 10.1, para generar el mapa base del área de estudio.

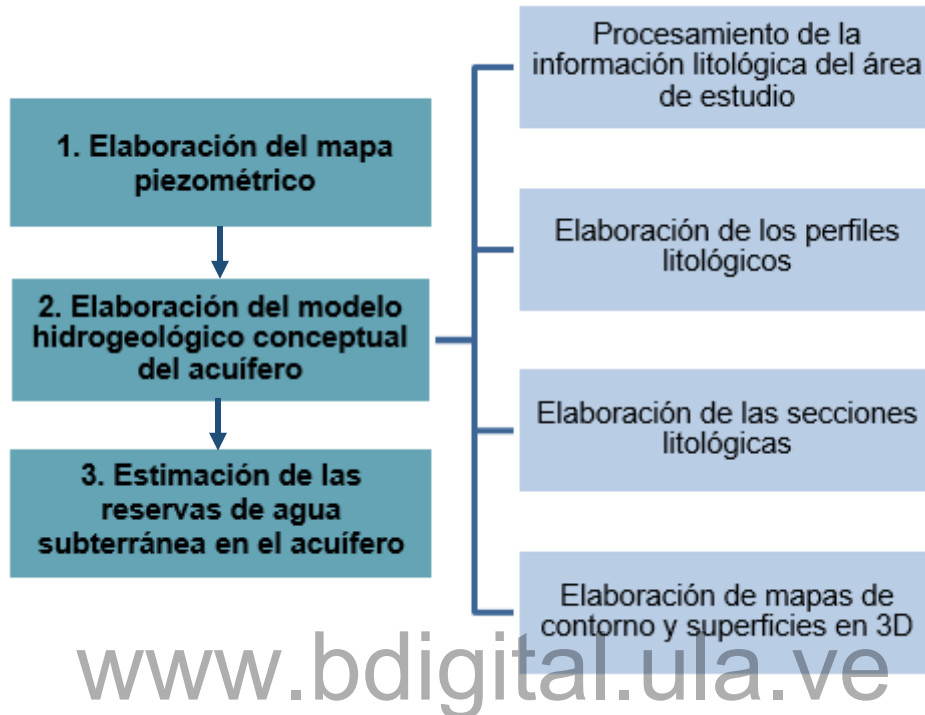
b) Estimación de la recarga natural del acuífero utilizando un modelo paramétrico a escala mensual: la estimación de la recarga natural del acuífero se realizó siguiendo los pasos mostrados en la Figura 3.6.



Fuente: Propia.

Figura 3.6. Pasos para la estimación de la recarga natural del acuífero.

c) Estimación de las reservas de agua subterránea: para el cálculo de las reservas de agua subterránea en el acuífero estudiado se siguieron los pasos mostrados en la Figura 3.7.

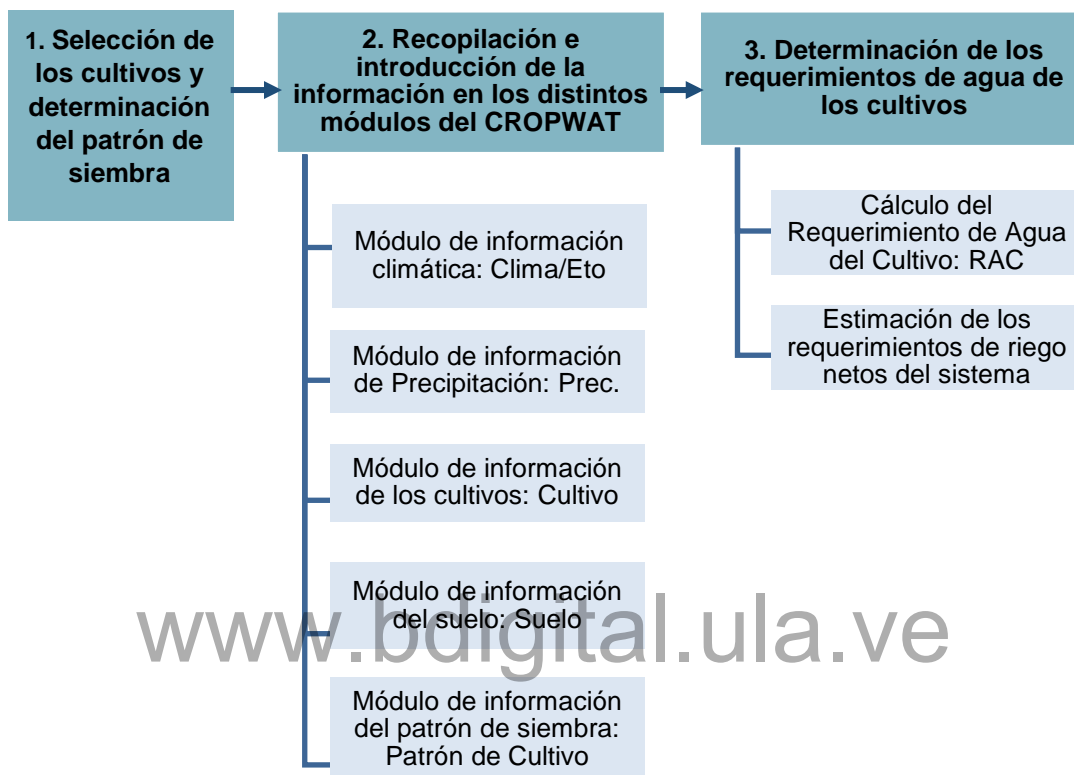


Fuente: Propia.

Figura 3.7. Pasos para la estimación de las reservas de agua subterránea en el acuífero.

Es de notar que, a partir de la información litológica de los pozos de agua subterránea presentes en el área de estudio obtenida de la base de datos del SIGATLAS (2004), se definieron 9 capas o estratos con una composición litológica característica de los depósitos de la zona y se procedió a elaborar y correlacionar los perfiles y secciones litológicas del área de estudio.

d) Requerimientos hídricos correspondientes a cultivos seleccionados dentro del área de estudio: de manera general para determinar el requerimiento de agua de los cultivos se realizaron las actividades mostradas en la Figura 3.8.



Fuente: Propia.

Figura 3.8. Pasos para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

En tal sentido, se determinó el requerimiento de agua de los cultivos de arroz, maíz y sorgo representativos del área de estudio, para un porcentaje de siembra determinado a partir de un patrón de siembra histórico. El porcentaje correspondiente a otros rubros se le asignó a un cultivo de referencia el cual fue pasto. Para ello se utilizó el programa CROPWAT en su versión 8.0, el cual es un programa creado por la FAO para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos con base a la información ingresada por el usuario para los módulos de información climática (Clima/Eto), precipitación (Prec.), información de cultivo (Cultivo) e información del suelo (Suelo). Por lo tanto, una vez completados estos módulos con la

información requerida se procedió a consultar el módulo Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC) para cada uno de los cultivos considerados en este trabajo y de esa forma conocer el requerimiento de riego (mm/dec) de cada uno de ellos, es decir, la deficiencia de agua que presenta o presentará cada cultivo durante los meses de su ciclo vegetativo. Como los resultados de dichos requerimientos de riego estaban dados en “milímetros/Década”, en donde “Década” indica una distribución decadiaria de los meses evaluados, se sumaron los requerimientos de riego para las Décadas de cada mes obteniendo así el déficit de precipitación en mm/mes, luego ese resultado se dividió entre la eficiencia considerada para cada cultivo y se realizaron las transformaciones necesarias para llevar ese requerimiento de riego a l/s/ha. Posteriormente, para obtener el requerimiento de riego del área real se multiplicó el valor obtenido para una hectárea por el número total de hectáreas considerado. El análisis de los requerimientos de agua de los cultivos se realizó para un escenario histórico (año 2009), uno actual (año 2022) y escenarios futuros considerando condiciones de cambio climático (años 2060 y 2080 para un RCP 4.5 y un RCP 8.5).

3.3.3. Interpretación de los datos

Esta etapa consistió en interpretar toda la información y hacer un análisis integral de los resultados para así proponer estrategias de uso racional del agua subterránea con fines de riego, entre los ríos Guache y Sarare, considerando condiciones de cambio climático.

CAPÍTULO 4. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NATURAL Y ANÁLISIS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En este capítulo se describen las actividades realizadas para analizar la variación del balance hídrico, considerando condiciones de cambio climático, del acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa. Para realizar esto, fue necesario estimar (i) la recarga natural del acuífero a partir de datos históricos de precipitación y evaporación (utilizando un modelo hidrológico paramétrico a escala mensual) y, (ii) realizar un análisis de la variación de la recarga natural considerando condiciones de cambio climático. A continuación se describen en detalle cada uno de estos aspectos.

4.1. Recopilación de la información hidroclimática básica para la(s) cuenca(s) involucrada(s)

Esta etapa consistió en recopilar aquellos estudios que contenían información básica sobre el área de estudio, bien sea información cartográfica, climática o hidrológica de la(s) cuenca(s) involucrada(s). Después de realizar dicha recopilación, se seleccionó la cuenca del río Acarigua para la estimación de la recarga natural del acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare. Si bien es cierto que dicha cuenca se encuentra ubicada un poco más arriba del área de estudio, su escogencia se basa fundamentalmente en que la misma disponía de información confiable de la estación hidrométrica del río Acarigua en Puente Acarigua. Es importante mencionar que la estimación de la recarga se realizó a través de la calibración del modelo de simulación hidrológica a escala mensual (SIHIM), elaborado por Duque y Barrios (1991) y que, además, permitió simular la recarga del acuífero con el modelo calibrado.

4.1.1. Descripción de la cuenca hidrográfica del río Acarigua

El río Acarigua nace en la confluencia de los ríos Yacambú y Bucaral, estado Lara. Al desplazarse en sentido norte-sur y al atravesar la región, sirve de drenaje natural a las tierras altas aproximadamente hasta Villa Bruzual, ciudad capital del distrito Turén. En su parte baja, el río tiende a desbordarse e inundar las zonas adyacentes. Tal condición fue motivo para que al comenzar el desarrollo de la región, se construyera el canal piloto del río Acarigua, considerado el primer gran drenaje, que en una longitud de 35.33 km y rumbo franco al sur, desvía sus aguas directamente al río Portuguesa. Bandes (1980).

Correa (2010) con respecto a la cuenca del río Acarigua señala lo siguiente:

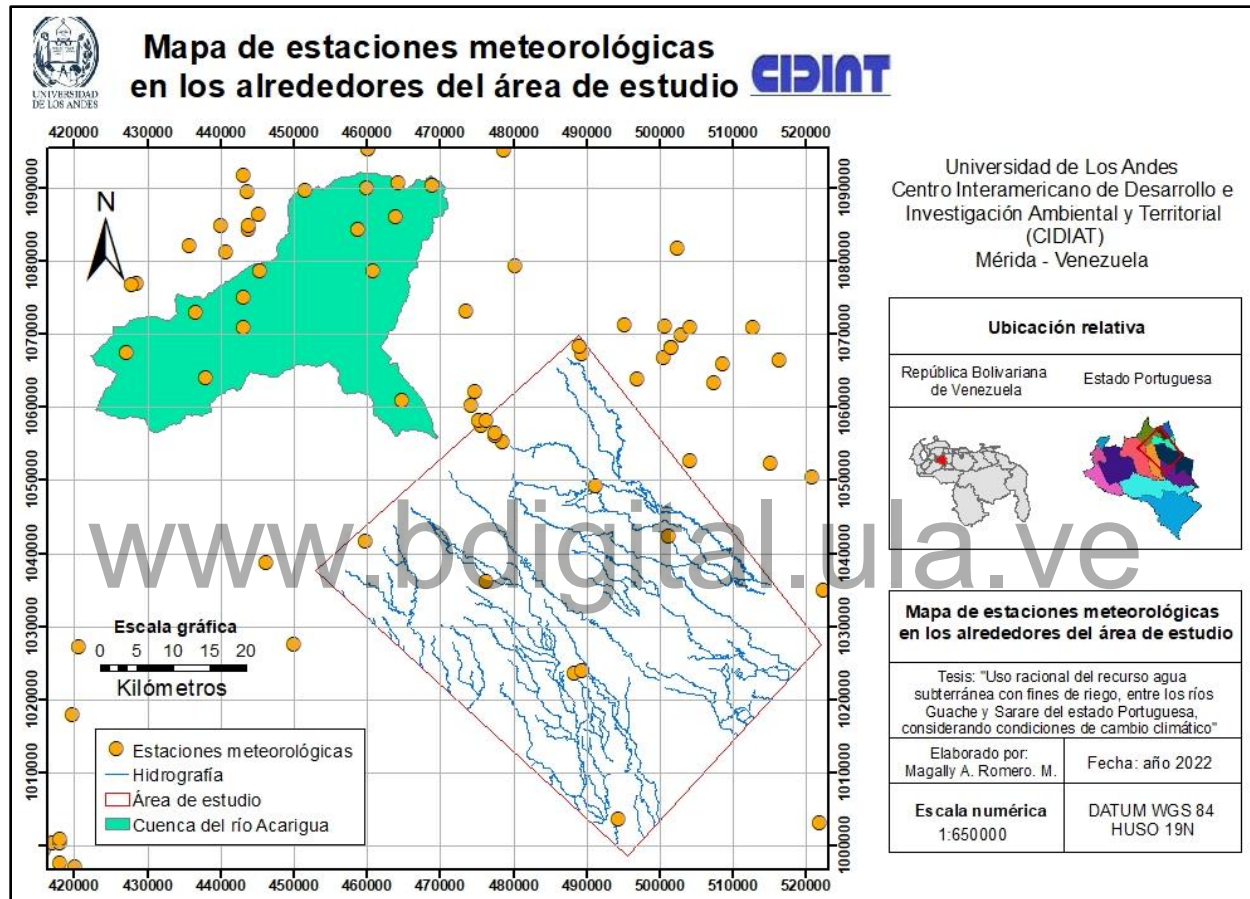
- Nacimiento: este río se forma por la confluencia de los ríos Yacambú y Bucaral, cerca de Las Adjuntas (límite entre los estados Portuguesa y Lara).
- Trayectoria: se asocia a una topografía montañosa de pendientes pronunciadas, estribaciones suaves y finalmente una amplia planicie de deyección por donde el río se desplaza hacia el SE.
- Afluentes: río Boco y quebradas y caños (Grande, Tierra Tinta, Agua Linda, El Zorro, Carpao, El Potrero y Garrapata).
- Longitud aproximada del cauce: 134 km.
- Uso agrícola intensivo en sus márgenes.
- Fuente de abastecimiento de agua de la conurbación Acarigua-Araure.

4.2. Análisis y procesamiento de la información hidroclimática recopilada

4.2.1. Selección de las estaciones medidoras de precipitación

Para la selección de las estaciones se consideró la ubicación de las mismas con respecto a la cuenca en estudio, así como los años de registro (aquellas que tuvieran 10 o más años de datos históricos continuos y con el mismo período de años con información) y la calidad de los datos (porcentajes bajos de datos faltantes y englobados).

La información de las estaciones fue tomada de la base de datos hidroclimáticos del antiguo Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, datos que hoy pertenecen al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), y se tomaron en cuenta aquellas estaciones ubicadas dentro o en las cercanías de la cuenca del río Acarigua (tal como se observa en la Figura 4.1). En una selección preliminar se contabilizó un total de 159 estaciones en los alrededores de la cuenca en estudio (ver la Tabla 4.1).



Fuente: Propia.

Figura 4.1. Estaciones meteorológicas ubicadas tanto dentro como en las cercanías de la cuenca del río Acarigua.

Tabla 4.1. Estaciones hidroclimáticas encontradas en las cercanías del área de estudio

Estaciones meteorológicas en los alrededores del área de estudio				
Estación	Serial	Coordenadas UTM (m)		Inf. Disponible (años)
		Este	Norte	
El Baúl-Carretera	3309	582506.305	993970.309	1961-2005
Guanare-Aeropuerto	2299	417965.660	997653.795	1970-2003
Los Araguañeyes	2411	616119.995	996633.534	1971-1992
Guanare-El Apamatal	2298	420071.513	997188.864	1967-1971
Guanare-Parroquia	2296	415862.352	999316.659	1951-1971
Guanare	2297	417055.373	1000419.861	1952-1983
Guanare	2291	418062.953	1000448.506	1940-1946
Hacienda Coromoto	2293	417972.239	1000878.677	1951-1964
Puente Coromoto	2292	411561.071	1001015.146	1952-1983
Mesa de Cavacas	2281	521768.388	1003104.549	1978-2005
Santa Rosalía	2279	494294.820	1003713.045	1952-1958
Campamento Las Marías	2295	426528.075	1004885.490	1954-2005
Desembocadero	2282	403556.426	1011384.342	1952-2005
Hacienda San Rafael	2286	434476.573	1011904.841	1951-2005
Suruguapo	2171	419838.402	1017920.807	1958-2005
Guafas	2170	397357.886	1022273.012	1958-2005
Colonia Turen-I.A.N.	2277	488378.545	1023645.697	1951-1985
La Concepción	2173	385455.089	1024151.844	1961-2005
Potreritos	2260	420620.265	1027286.841	1958-2005
Ospino	2265	450062.008	1027576.021	1951-2005
El Amparo	3301	526482.546	1028782.006	1967-1983
Caño Benito	2378	592831.408	1031218.525	1953-2005
Biscucuy	2270	391804.177	1033345.569	1956-1961
Córdoba	2269	401871.413	1033318.825	1979-2004
Biscucuy	2271	392292.377	1033374.927	1940-1963
Biscucuy	2273	391530.471	1033653.490	1957-2005
Lagunitas	2374	533707.680	1034438.586	1952-1964
Santa María	2373	522360.502	1035044.511	1957-1959
Píritu	2267	476334.413	1036119.864	1956-2005
Las Vegas	2363	538219.585	1036899.758	1947-1954
Campo Elías	2179	383398.718	1038223.116	1940-1972
Campo Elías	2190	383369.141	1038530.371	1957-2007

Estaciones meteorológicas en los alrededores del área de estudio				
Estación	Serial	Coordenadas UTM (m)		Inf. Disponible (años)
		Este	Norte	
Ospino-La Estación	2266	446263.903	1038760.337	1951-2005
Palo Quemado	3303	532726.350	1040580.076	1967-2004
Chabasquen	2261	394267.924	1041816.296	1960-2005
Hacienda Guache	2253	459747.698	1041723.043	1951-2005
Experimental Silvicultura	2217	501192.195	1042316.491	1964-1978
Chabasquén	2262	395917.842	1042886.846	1941-1963
San José de Chirgua	2461	609789.651	1043487.876	1977-2003
Galera	2350	590321.835	1047552.700	1958-2005
Payara	2259	491160.675	1049258.204	1955-2005
Hato Las Babas	3304	556501.333	1049575.922	1967-2003
Guayabito	2362	520796.471	1050430.104	1956-1983
Las Vegas-Charcote	2364	540096.093	1050691.367	1954-2005
Santa Teresa	2342	515124.689	1052331.508	1948-2004
Tocuyano	2351	504149.083	1052605.051	1953-1983
Mata Oscura	2352	610766.990	1053504.192	1958-1983
Las Vegas	2365	540701.415	1054838.156	1947-1983
Acarigua	2256	477535.565	1056143.124	1939-1946
Acarigua	2258	477535.745	1056450.242	1954-1958
La Mesa	2252	390255.210	1057093.454	1961-2007
La Chivera	2366	569901.186	1058443.709	1947-1950
Acarigua	2255	475615.825	1057403.482	1954-1983
Araure-Potreros	2247	475189.490	1058079.417	1946-1954
Araure	2254	476317.427	1058170.837	1958-1970
Acarigua-Aeropuerto	2264	474184.996	1060229.914	1970-2003
Sabana Grande-Guago	2139	405413.849	1059540.564	1940-2007
Araure	2248	474795.846	1062072.219	1961-1985
Hacienda Camburito	2246	464736.338	1060943.873	1955-2005
La Flecha	2353	542459.332	1063930.948	1947-1949
Guárico	2244	412009.052	1064009.008	1957-2007
Cojedes	2341	507348.100	1063354.627	1943-1962
Guárico	2245	413227.661	1063729.753	1957-2004
Humocaro Alto-Vivero	2251	391372.114	1063817.097	1961-2007
Guárico	2243	413106.443	1064037.178	1945-1976
Miracuy	2219	437917.600	1064080.335	1969-2004
El Limón	2355	544683.566	1064547.791	1950-1954

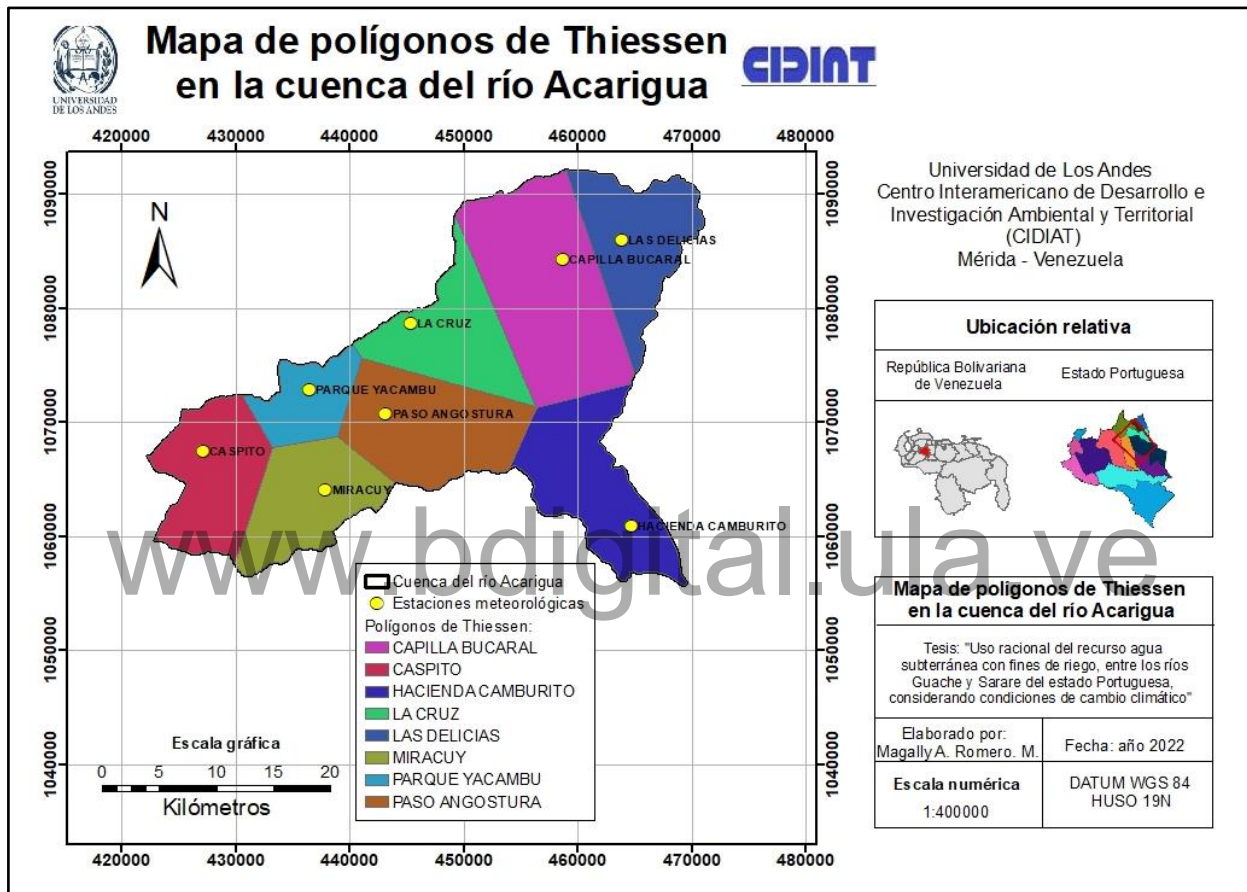
Estaciones meteorológicas en los alrededores del área de estudio				
Estación	Serial	Coordenadas UTM (m)		Inf. Disponible (años)
		Este	Norte	
El Retazo	2343	546481.612	1064703.548	1959-1964
El Retazo	2358	546419.815	1065379.148	1968-2005
Los Colorados	2354	541726.016	1065557.879	1967-1983
Cojeditos	2340	508627.591	1065965.406	1962-1983
Yaguara	3302	547851.453	1066025.921	1967-1983
El Pao-Oficina	2349	604022.952	1066508.604	1944-2005
San Carlos	2344	542456.536	1066387.939	1941-1946
Camoruco	2339	516246.595	1066367.240	1947-1954
La ceiba-camoruco	2333	528345.705	1066466.655	1955-1983
Las majaguas	2334	500490.304	1066762.864	1962-1983
Morita-Caserío	2348	581162.059	1067035.575	1956-2005
Agua Blanca	2238	489427.651	1067286.373	1961-1976
Caspito	2231	427164.729	1067478.072	1968-2004
San Carlos	2345	544953.578	1068110.769	1940-1946
San Carlos-Oficina Riego	2346	542454.435	1068230.685	1960-1962
Experimental Las Majaguas	2300	501617.844	1068206.357	1978-2004
Agua Blanca	2239	489031.740	1068238.550	1946-2004
San Rafael de Onoto	2331	502989.073	1069803.464	1946-2004
El Morro	2102	378956.285	1070489.898	1984-2007
Paso Angostura	2227	443170.231	1070798.214	1968-2004
Apartadero	2332	504055.529	1070817.062	1946-1962
Guabinas	2357	512740.238	1070880.501	1967-1992
Humocaro Bajo	2241	394989.337	1071055.836	1950-2007
Guamitas	7202	500703.527	1070970.383	1962-1964
Morena	2335	544066.288	1071058.114	1940-1983
Agua de Obispos	2128	379324.502	1071256.647	1942-1984
La Chara	2347	564452.774	1071302.879	1947-1950
Carrizalito	7201	495218.498	1071277.761	1962-1964
San Carlos-UNELLEZ	2311	547844.226	1071646.332	1981-2003
Tinaco	2336	561220.880	1072310.954	1943-2005
Parque Yacambú	2232	436530.367	1072866.657	1968-2004
Auro	2228	473553.868	1073098.681	1956-1983
La Escalera	2236	443115.675	1075005.993	1969-1984
Sanare	2235	428493.208	1076873.954	1942-1985
Las Cuatro	2124	388574.566	1076388.370	1962-2007

Estaciones meteorológicas en los alrededores del área de estudio				
Estación	Serial	Coordenadas UTM (m)		Inf. Disponible (años)
		Este	Norte	
Sanare	2234	427761.519	1076660.367	1942-2007
El Tocuyo-Dos Cerritos	2268	411277.567	1076910.970	1974-2007
El Guamito	2289	460883.639	1078668.695	1968-1978
La Cruz	2233	445345.416	1078688.235	1969-2003
El Pao Planta	2338	597163.553	1078684.229	1950-2005
El Tocuyo-Caja de Agua	2222	412353.599	1080962.795	1950-1974
El Zancudo	1222	440687.809	1081152.427	1964-2004
Tucuragua-Dos Bocas	1230	502409.217	1081719.634	1971-1982
Cubiro	2225	435753.859	1082020.614	1941-2004
Manrique	2324	552732.340	1084276.007	1946-1983
Agua Negra	1220	443861.006	1084310.961	1964-2004
Capilla Bucaral	2226	458696.296	1084322.180	1968-2004
El Jabón	2106	376991.129	1084534.350	1941-2004
Aguadita	2326	568298.556	1084516.662	1947-1983
San Miguel	2212	443739.948	1084833.270	1945-1950
Valle del rio	2325	556691.269	1085080.455	1952-1972
Las Delicias	2288	463846.081	1086036.712	1968-2004
Macapo	2307	561533.025	1086132.518	1946-1952
Las Tablas	1221	445173.908	1086336.068	1964-2004
San Miguel	2216	443655.539	1089409.683	1957-1983
Cruz Machadera	2221	451574.936	1089552.001	1968-2002
Riecito	2237	459981.819	1089971.910	1969-2004
Las Trojas	2290	468845.136	1090209.075	1968-1984
Las Cumbres	2287	464307.493	1090704.580	1968-1999
San Pedro	2109	382587.031	1090936.098	1961-2004
San Miguel	2215	443049.738	1091591.265	1962-2004
Vallecito	2308	558355.712	1091962.877	1952-2005
Cachinche	2319	594354.418	1092836.823	1962-1973
Barrancones	2407	620388.468	1095432.287	1965-1973
Cachinche	2318	593891.059	1095354.311	1951-2004
La Sierra	2303	545133.551	1095261.097	1941-2000
Maporal	2208	478716.012	1095085.353	1956-2004
Tinaquillo	2315	574338.903	1095278.394	1962-1984
Quibor	2204	430997.457	1096249.723	1945-2004
Rio Claro	2205	461724.473	1096296.889	1953-2004

Estaciones meteorológicas en los alrededores del área de estudio				
Estación	Serial	Coordenadas UTM (m)		Inf. Disponible (años)
		Este	Norte	
Tinaquillo	2316	577199.101	1096482.221	1943-2004
Quibor	2210	432187.932	1097752.487	1958-1973
Chaimare	7221	428533.659	1097759.448	1975-1978
Hacienda Altagracia	7220	429450.789	1099600.520	1972-1973
Sicarigua	2108	378047.300	1099797.682	1945-2004
Las Dos Bocas	491	609925.020	1100866.825	1949-2005
Curarigua	2201	399105.558	1105108.641	1950-2004
Chivacoa	1347	609394.130	1105227.038	1943-1946
San Luis-Casa Dorta	1377	609394.130	1105227.038	1940-1950
Campo de Carabobo	1397	591672.357	1105576.952	1951-2005
Santo Domingo	1298	490899.671	1105553.277	1949-1962
Los Aguacates	1395	605187.660	1106781.083	1962-2005
San Rafael de Pena	1299	492604.792	1106873.534	1949-1972
La Concordia	1223	446910.004	1107218.607	1968-1984
Canape	1204	441734.679	1107287.979	1950-2004
Los Arangues	1199	384500.092	1108254.704	1941-2001
Planta El Manzano	2209	465268.606	1108578.490	1957-2004
Cabudare	1294	471235.576	1109064.683	1942-1946
Guadalupe	1274	425421.578	1109713.618	1962-2004
Agua Blanca	489	627158.604	1110384.581	1951-2005
Barquisimeto-Aeropuerto	1282	459791.042	1110365.502	1921-1992
El Rodeo-Exposición Occidental	1297	484965.665	1111820.570	1949-1989

Fuente: Datos tomados de MARN, s.f.

Posteriormente, se realizó un filtrado de las estaciones climáticas a considerar en el estudio. Para ello, se estimó el área de influencia de cada estación aplicando la metodología de los Polígonos de Thiessen y se descartaron aquellas estaciones que no ejercen influencia en la cuenca estudiada, es decir, la cuenca del río Acarigua. En la Figura 4.2 se observan las estaciones que ejercen una influencia directa en la cuenca del río Acarigua.



Fuente: Propia.

Figura 4.2. Polígonos de Thiessen para las estaciones de precipitación en la cuenca del río Acarigua.

Para la selección final de las estaciones se consideraron aquellas que tuvieran más de 10 años de registros continuos y con el mismo período de años con información. Es importante señalar que la selección de las estaciones para el período de calibración depende del período en común que tengan con la estación hidrométrica que, en este caso, fue la estación de Acarigua en puente Acarigua. Por su parte, el período de tiempo para el proceso de modelación depende de los datos de información disponibles para las estaciones seleccionadas, el cual puede o no coincidir con el del proceso de calibración.

Del análisis de consistencia antes descrito, resultaron 8 estaciones con información confiable para la calibración y simulación de la recarga por flujo subterráneo afluente al acuífero en estudio. En la Tabla 4.2 se muestran las estaciones seleccionadas con sus datos de serial, coordenadas UTM y años de registro; mientras que, en la Tabla 4.3 se observan los años de registro disponibles (resaltados en color verde) para el período 1960-2000, de las estaciones seleccionadas para realizar la calibración del modelo SIHIM en la cuenca del río Acarigua.

Tabla 4.2. Estaciones seleccionadas para la cuenca del río Acarigua

Estaciones de precipitación seleccionadas				
Estación	Serial	Coordenadas UTM (m)		Inf. Disponible (años)
		Este	Norte	
Hacienda Camburito	2246	464736.34	1060943.87	1955-2005
Capilla Bucaral	2226	458696.30	1084322.18	1968-2004
Parque Yacambú	2232	436530.37	1072866.66	1968-2004
Paso Angostura	2227	443170.23	1070798.21	1968-2004
Miracuy	2219	437917.60	1064080.34	1969-2004
Caspito	2231	427164.73	1067478.07	1968-2004
Las Delicias	2288	463846.08	1086036.71	1968-2004
La Cruz	2233	445345.42	1078688.24	1969-2003

Fuente: Datos tomados de MARN, s.f.

Tabla 4.3. Años de registro disponibles (período 1960-2000) de las estaciones de precipitación seleccionadas

Años de registros disponibles para el período 1960-2000 de las estaciones de precipitación seleccionadas		Años																			
Serial	Estación	1960				1970				1980				1990				2000			
		2246	Hacienda Camburito																		
2226	Capilla Bucaral																				
2232	Parque Yacambú																				
2227	Paso Angostura																				
2219	Miracuy																				
2231	Caspito																				
2288	Las Delicias																				
2233	La Cruz																				

Fuente: Propia.

4.2.2. Ubicación y selección de las estaciones hidrométricas

La información de las estaciones hidrométricas permite calibrar los parámetros del modelo de simulación hidrológica (SIHIM). En particular, se utilizó la información de la estación hidrométrica Acarigua en Puente Acarigua tomada de la base de datos hidroclimáticos del antiguo Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, datos que hoy pertenecen al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), ver la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Estación hidrométrica considerada

Estación hidrométrica seleccionada					
Estación	Serial	Estado	Coordenadas REGVEN UTM		Inf. Disponible (años)
			Este (m)	Norte (m)	
Acarigua en Puente Acarigua	0005	Portuguesa	470673.14	1051786.69	1950-1989

Fuente: Datos tomados de MARN, s.f.

4.2.3. Estimación de los registros faltantes

Para la estimación de datos faltantes en las distintas estaciones, se utilizó la metodología citada por Vásquez (2019), la cual consiste en realizar una correlación lineal mes a mes entre las estaciones seleccionadas con sus respectivos promedios, creando una estación “ficticia” correspondiente a la correlación de los promedios. Luego, se compara la estación con datos faltantes con cada una de las estaciones restantes, incluyendo la estación “ficticia”, evaluando con cual existe mayor correlación, y que además, tenga suficientes datos para completar el o los datos faltantes. Finalmente, se mide la ganancia o pérdida de información a través de la fórmula de Langbein (ver la Ec. 4.1):

$$N = \frac{Nt}{\left(1 + \left(\frac{Ne}{Nr - 2}\right) \times (1 - r^2)\right)} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

N = Longitud efectiva de registro

Nt = Número total de años

Nr = Número de años con registro

Ne = Número de años faltantes

γ = Coeficiente de correlación

Si N es mayor que Nr se pueden completar los datos faltantes puesto que se gana información. En caso contrario, la longitud efectiva de registro (N) sería menor que el número de años con registro (Nr) y no se ganaría información al completar dicho registro.

En la Tabla 4.5 se observa un ejemplo de la correlación realizada en el mes de enero y la estación utilizada para representar los datos de la estación con datos faltantes (celda resaltada en verde) y su respectivo coeficiente de correlación. Una vez completados los datos, se puede realizar la calibración y simulación de la cuenca con el modelo hidrológico paramétrico a escala mensual. Es de notar, que para este proceso de completación de datos se utilizaron 14 estaciones que se encuentran en las cercanías de la cuenca en estudio para tener una mayor precisión en los resultados.

www.bdigital.ula.ve

Tabla 4.5. Completación de datos en las estaciones seleccionadas para la calibración y simulación de la cuenca del río Acarigua

Proceso de completar datos en las estaciones seleccionadas														
Estaciones	Serial de las estaciones utilizadas													
	2246	2234	2226	2220	2232	2227	2219	2231	2221	1221	2287	2237	2288	2233
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		0.1323761	0.3002168	0.247329	0.4016775	0.472288	0.5573128	0.2033644	0.5164289	0.5354556	0.3242302	0.524781	0.3412293	0.5942299
2	0.1323761		0.4284771	0.2536281	0.521291	0.2461759	0.4583499	0.6159966	0.4034662	0.6622649	0.511564	0.560627	0.4571579	0.4510921
3	0.3002168	0.4284771		0.0686602	0.8292891	0.7450763	0.7598487	0.5875736	0.6952834	0.7547027	0.7229431	0.7860984	0.8732936	0.7764248
4	0.247329	0.2536281	0.0686602		0.0948789	0.1533414	0.1909259	0.1974737	0.3797017	0.2363111	-0.080742	0.1565035	0.1022912	0.2726116
5	0.4016775	0.521291	0.8292891	0.0948789		0.789577	0.895031	0.5397107	0.7578698	0.8455118	0.6642748	0.738502	0.7715758	0.8440259
6	0.472288	0.2461759	0.7450763	0.1533414	0.789577		0.7116697	0.4400765	0.6696618	0.6402853	0.5408033	0.6038169	0.7503501	0.7175499
7	0.5573128	0.4583499	0.7598487	0.1909259	0.895031	0.7116697		0.4832124	0.7310465	0.7914373	0.5533982	0.7024616	0.7062116	0.8205511
8	0.2033644	0.6159966	0.5875736	0.1974737	0.5397107	0.4400765	0.4832124		0.3768335	0.5041687	0.4654795	0.6466437	0.6307477	0.4518133
9	0.5164289	0.4034662	0.6952834	0.3797017	0.7578698	0.6696618	0.7310465	0.3768335		0.8014027	0.6785844	0.689468	0.7265787	0.9281288
10	0.5354556	0.6622649	0.7547027	0.2363111	0.8455118	0.6402853	0.7914373	0.5041687	0.8014027		0.730036	0.7594743	0.7015982	0.8939277
11	0.3242302	0.511564	0.7229431	-0.080742	0.6642748	0.5408033	0.5533982	0.4654795	0.6785844	0.730036		0.8359085	0.8801854	0.6880982
12	0.524781	0.560627	0.7860984	0.1565035	0.738502	0.6038169	0.7024616	0.6466437	0.689468	0.7594743	0.8359085		0.8492473	0.6767177
13	0.3412293	0.4571579	0.8732936	0.1022912	0.7715758	0.7503501	0.7062116	0.6307477	0.7265787	0.7015982	0.8801854	0.8492473		0.755434
14	0.5942299	0.4510921	0.7764248	0.2726116	0.8440259	0.7175499	0.8205511	0.4518133	0.9281288	0.8939277	0.6880982	0.6767177	0.755434	
PROM.	0.5740831	0.5851554	0.8655443	0.2978418	0.9105555	0.8006688	0.8820358	0.6580066	0.8805167	0.9019935	0.7630746	0.853668	0.877119	0.9302424
MAX.	0.5942	0.6623	0.8733	0.3797	0.9106	0.8007	0.8950	0.6580	0.9281	0.9020	0.8802	0.8537	0.8802	0.9302
EST.	14													
COEF. CORR	0.5942													

Fuente: Propia.

4.2.4. Selección de los períodos de registro histórico para efectuar la calibración y simulación del modelo

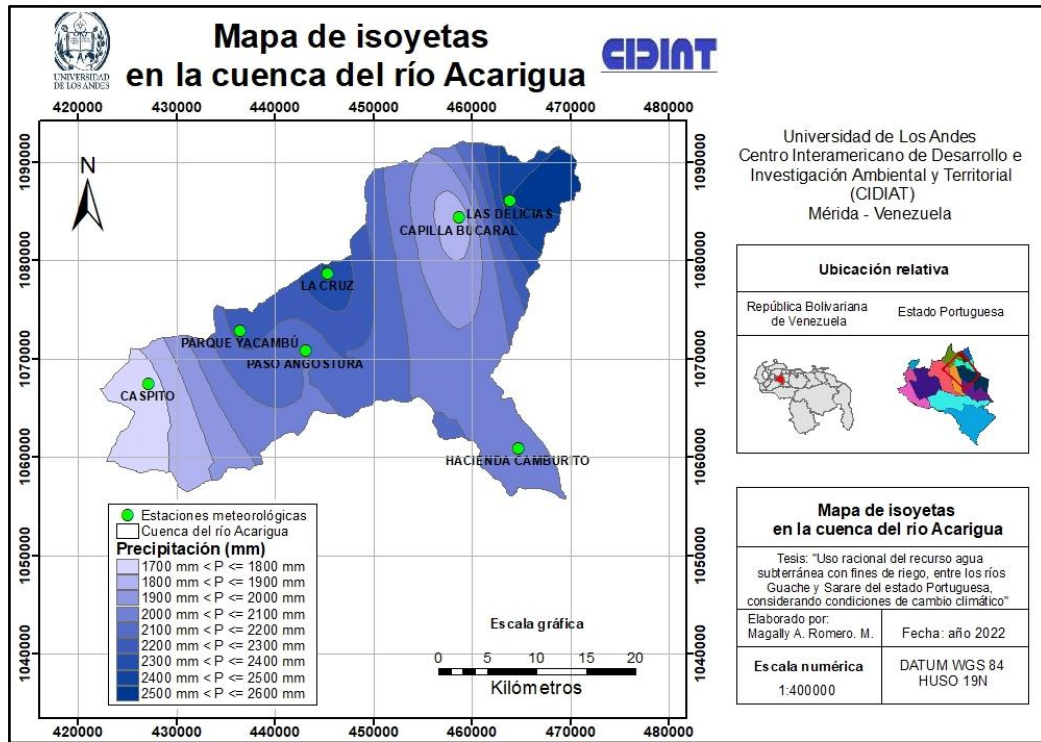
Posterior a la estimación de datos faltantes, se efectuó un análisis de los años de registro de las estaciones, con el propósito de seleccionar aquellas estaciones con más de 10 años de registro continuo y que, además, tuvieran el mismo período de años con información, que fuese suficiente y representativo de las condiciones climáticas de la cuenca.

Finalmente, se seleccionaron las estaciones que se utilizarían en los procesos de calibración y simulación con el modelo hidrológico SIHIM, tomando en cuenta que la selección de las estaciones climáticas en la etapa de calibración depende del período en común que tengan con la estación hidrométrica.

En este caso, el período seleccionado para la calibración del modelo SIHIM en la cuenca del río Acarigua fue desde el año 1975 hasta el año 1987, para un total de 13 años de registros históricos. Para el proceso de modelación con el SIHIM en la cuenca en cuestión se utilizó el período de años desde 1975 hasta 1997, para un total de 23 años de registro.

4.2.5. Determinación de la precipitación media de la cuenca

La precipitación media de la cuenca se obtuvo como el promedio de los valores medios obtenidos por los métodos de isoyetas y polígonos de Thiessen. En ese sentido, se realizó un mapa isoyético (ver la Figura 4.3) y un mapa de polígonos de Thiessen (ver la Figura 4.2) en la cuenca del río Acarigua para la fase de calibración, y a partir de esos mapas se determinó la precipitación media anual por el método de las isoyetas y por el método de los polígonos de Thiessen, respectivamente. En la Tabla 4.6 se observan los valores obtenidos por cada método. Una vez que se determinó la precipitación media por ambos métodos, con un factor de ajuste de 0.993, se tiene que la precipitación promedio en la cuenca del río Acarigua es de 2094.75 mm.



www.bdigital.ula.ve Fuente: Propia.
 Figura 4.3. Mapa de isoyetas en la cuenca del río Acarigua.

Tabla 4.6. Precipitación media por Thiessen e isoyetas en la fase de calibración del modelo

Precipitación media en la fase de calibración		
Precipitación media por Thiessen (mm)	2102.14	
Precipitación media por isoyetas (mm)	2087.36	Factor isoyético
		0.993

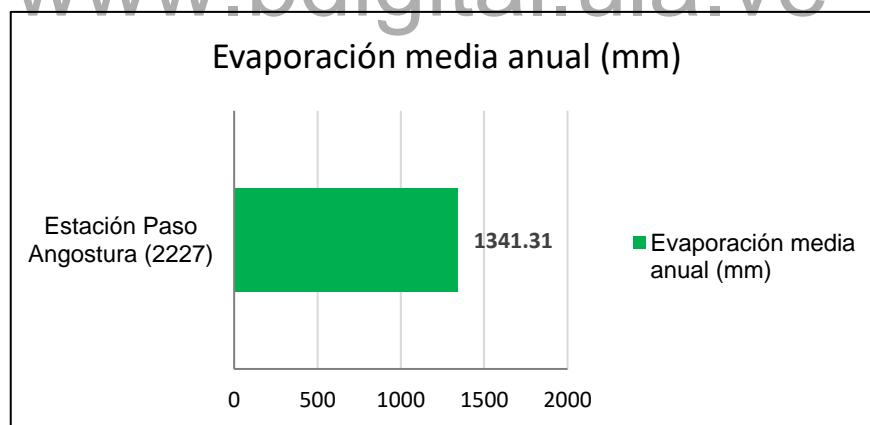
Fuente: Propia.

4.2.6. Selección de los datos de evaporación y determinación de la evaporación media

Para la selección de los datos de evaporación se tomaron en cuenta los mismos criterios que se usaron para la selección de las estaciones de precipitación. En principio se tomaron 30

estaciones ubicadas dentro y en los alrededores de la cuenca del río Acarigua, de las cuales quedaron 3 con influencia en la cuenca al aplicar los polígonos de Thiessen. No obstante, dos de esas tres estaciones se encontraban fuera de la cuenca y tenían muy poca influencia sobre ella por lo cual solamente se consideró la estación de Paso Angostura (serial 2227) para la fase de calibración y cálculos posteriores. En la Tabla 4.7 se observan los promedios mensuales para dicha estación y la evaporación media anual para el período 1975-1997. Es importante señalar que se tomó en cuenta el período de 1975-1987 para la fase de calibración para que los datos coincidieran con el período de registro en las estaciones de precipitación y en la estación hidrométrica.

Además, en vista de que los datos de evaporación no tienen variaciones significativas durante todo el año, se consideraron los valores medios mensuales de la estación en el período 1976-1988 (dónde se tenían registros completos) para completar los datos faltantes. Igualmente, debido a que en este caso se trabajó con una sola estación de evaporación para toda la cuenca del río Acarigua, el porcentaje de influencia de la estación sobre dicha cuenca es de 100%. En la Figura 4.4 se muestra la evaporación media anual para la estación Paso Angostura.



Fuente: Propia.

Figura 4.4. Evaporación media anual para la estación seleccionada.

Tabla 4.7. Estación de evaporación seleccionada

Promedios mensuales de la estación de evaporación (mm) seleccionada para la calibración y simulación del modelo													
Estación Paso Angostura (Serial 2227)													
Período	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1975-1997	131.40	131.81	147.10	115.06	91.96	90.85	99.90	106.55	108.72	108.90	99.51	109.53	1341.31

Fuente: Propia.

www.bdigital.ula.ve

4.3. Simulación hidrológica a nivel mensual

La simulación de la recarga del acuífero se realizó utilizando los parámetros obtenidos en la calibración del modelo paramétrico SIHIM. Es de notar que, se usó una versión modificada del programa SIHIM llamada CARORAM, ya que esta mostraba los resultados del flujo subterráneo efluente directamente en el archivo de salida. Sin embargo, para efectos de este trabajo se seguirá llamando al programa como SIHIM.

4.3.1. Calibración del modelo

El proceso de calibración consiste en tratar de realizar el ajuste de la escurrimiento generada por el modelo y la observada para el período considerado, combinando los parámetros que afectan el movimiento del agua durante las fases del ciclo hidrológico. Mejias, (2005). En el presente trabajo se consideró la cuenca del río Acarigua para la calibración del modelo SIHIM, y se tomó como punto de control la estación hidrométrica de Acarigua en Puente Acarigua (serial 0005), ya que esta disponía de registros hidrométricos que coincidían con los registros climáticos.

Los datos utilizados para la calibración de la cuenca del río Acarigua en la estación hidrométrica de Acarigua en Puente Acarigua van desde el año 1975 hasta el año 1987, para un total de 13 años de registro. Se utilizaron 8 estaciones de precipitación y 1 estación de evaporación con el mismo período de información.

Se debe señalar que el programa a utilizar para la simulación de la recarga (SIHIM) requiere para la calibración, además de los datos de precipitación y evaporación, el área de influencia de las estaciones meteorológicas. Dicha área se calculó a través del método de los polígonos de Thiessen. Los resultados correspondientes a las áreas de influencia de las estaciones de precipitación se muestran en la Tabla 4.8, expresados en porcentaje del área total de la cuenca (880.711 km²) junto con sus respectivas áreas en Km². La estación de evaporación utilizada fue la estación de Paso Angostura (serial 2227) cuyos datos se muestran en la Tabla 4.7 y cuyo porcentaje de influencia sobre la cuenca del río Acarigua como ya se dijo es del 100 %.

Tabla 4.8. Áreas de influencia con respecto a la cuenca del río Acarigua de las distintas estaciones

Áreas de influencia con respecto a la cuenca del río Acarigua de las estaciones					
Variable	Estación	Serial	Período	Porcentaje de influencia (%)	Área (Km ²)
Precipitación	Hacienda Camburito	2246	1975-1987	13.71	120.71
	Capilla Bucaral	2226		21.30	187.57
	Parque Yacambú	2232		5.87	51.74
	Paso Angostura	2227		14.51	127.79
	Miracuy	2219		10.73	94.54
	Caspito	2231		11.42	100.61
	Las Delicias	2288		11.43	100.66
	La Cruz	2233		11.02	97.10

Fuente: Propia.

4.3.1.1. Entradas del modelo y estimación inicial de los parámetros

En la Tabla 4.9 se describen los parámetros de entrada al modelo empleados en este estudio, los cuales se fueron modificando en el proceso de calibración hasta conseguir un ajuste aceptable entre los valores observados en campo y los generados por el modelo, es decir, que existiera poca diferencia entre los volúmenes de escorrentía observados y simulados, y además un buen coeficiente de correlación. No obstante, el proceso de calibración con el programa SIHIM sigue siendo un proceso subjetivo y va a depender en gran medida de los criterios tomados en cuenta por el usuario al momento de calibrar.

Tabla 4.9. Parámetros de entrada al modelo SIHIM

Descripción de parámetros de entrada al modelo SIHIM	
Parámetro	Descripción
CINF	Capacidad de infiltración.
HSN	Capacidad nominal de almacenamiento de humedad del suelo.
CT	Factor para convertir la evaporación de tina a evapotranspiración potencial.
PQB	Fración del almacenamiento de agua subterránea que sale como flujo base.
PFSE	Fración del almacenamiento de agua subterránea que sale como flujo subterráneo efluente.

Descripción de parámetros de entrada al modelo SIHIM	
Parámetro	Descripción
PESC	Fracción del almacenamiento en superficie que sale de la subcuenca, como escurrimiento, durante el mes.
AIHS	Almacenamiento inicial de la humedad del suelo.
AIAS	Almacenamiento inicial del agua subterránea.
AISUP	Almacenamiento inicial en la superficie.
FSUPA	Flujo superficial afluente.
FSUBA	Flujo subterráneo afluente.

Fuente: Propia.

Los valores iniciales de los parámetros de entrada al modelo se estimaron tomando en cuenta la información proporcionada en el manual del usuario del modelo SIHIM, corregido por Duque (1991). Estas estimaciones iniciales de dichos valores se utilizan en la primera corrida del modelo y se van variando hasta conseguir una buena correlación entre los datos observados y los datos simulados. Es importante destacar, que para la preparación del archivo de entrada al modelo se consideró la opción de ejecución del programa conocida como autocalibración, esto para facilitar el proceso de calibración puesto que, como lo señala Mejías (2005), se trata de una rutina que encuentra el valor óptimo del parámetro dentro de los intervalos definidos por el usuario en el mencionado archivo de entrada.

4.3.1.2. Valores finales de los parámetros y salidas del modelo

En la Tabla 4.10 se muestran los valores finales obtenidos para los parámetros del modelo en la fase de calibración.

Tabla 4.10. Valores finales de los parámetros del modelo en la fase de calibración para la cuenca del río Acarigua

Valores finales de los parámetros del modelo	
Parámetros	Valores
CINF (mm)	115
HSN (mm)	170
CT	0.60
PQB	0.35

Valores finales de los parámetros del modelo	
Parámetros	Valores
PFSE	0.05
PESC	0.73

Fuente: Propia.

En relación a los resultados de la escorrentía total y la recarga total simulada para el acuífero, en el período 1975-1987, se tiene lo siguiente:

Escorrentía total:

Observada = 17852.590 mm

Simulada = 17613.160 mm

Diferencia = 1.34 %

Coefficiente de correlación lineal = 0.842

Recarga simulada para el período 1975-1987:

Flujo subterráneo efluente total = 490.5592 millones de m³ (Mm³). Lo cual representa un valor de recarga de 1.2 m³/s o una lámina de aproximadamente 557 mm de recarga al acuífero para el período 1975-1987.

4.3.2. Simulación de la recarga natural del acuífero

Debido a que dentro del área de estudio no se cuenta con una estación de aforo con registros históricos representativos, no fue posible calibrar el modelo dentro de dicha área. Por lo cual los parámetros obtenidos al calibrar la cuenca del río Acarigua en la estación Acarigua en Puente Acarigua, mostrados en la Tabla 4.10, fueron extrapolados y considerados como válidos para la misma.

La modelación se generó con las mismas estaciones usadas en la etapa de calibración del modelo, considerando períodos comunes de datos medidos de precipitación y evaporación. En este caso, el período disponible utilizado para la modelación fue desde 1975 hasta 1997, para un total de 23 años de registros históricos. Los porcentajes de influencia de las distintas

estaciones son los mismos. Igualmente, los parámetros de entrada utilizados son los obtenidos de la calibración y mostrados en la Tabla 4.10.

El valor obtenido para la recarga simulada en el período comprendido entre los años 1975 y 1997, que en este caso corresponde al valor del flujo subterráneo efluente se pueden resumir como sigue:

Flujo subterráneo efluente total = 423.3721 millones de m³ (Mm³)

Lo cual representa un valor de recarga de 0.58 m³/s o una lámina de aproximadamente 480.72 mm de recarga al acuífero para el período 1975-1997.

4.3.3. Análisis de la variación de la recarga natural considerando condiciones de cambio climático

Para analizar la variación de la recarga natural del acuífero en estudio considerando condiciones de cambio climático, se utilizó la información correspondiente a la fase 5 del Proyecto de Intercomparación de modelos de clima acoplados, CMIP5, (*CMIP* en sus siglas en inglés, *Coupled Model Intercomparison Project*), empleada por el IPCC en su quinto informe de evaluación; dicha información se obtuvo a través de las páginas del *WorldClim* y *Climate Explorer*. Tal como se señala en su portal web, el *WorldClim* es una base de datos meteorológicos y climáticos globales de alta resolución espacial. Estos datos se pueden utilizar para el mapeo y el modelado espacial. Los datos se proporcionan para su uso en investigación y actividades relacionadas. Por su parte, el *Climate Explorer* es una aplicación web del Instituto Meteorológico Real de los Países Bajos (KNMI por sus siglas en holandés *Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut*) para analizar datos climáticos estadísticamente. Recopila una gran cantidad de datos y herramientas de análisis tanto para observaciones como para escenarios, y forma parte del Centro Regional del Clima de la OMM en KNMI, junto con el proyecto europeo de evaluación y conjunto de datos climáticos; como lo señala la Plataforma Europea de Adaptación al Clima en su página web.

Por consiguiente, siguiendo la metodología aplicada por Vázquez (2019) para analizar la influencia del cambio climático en la zona, lo primero que se realizó fue la selección del modelo climático con el cual se trabajaría, mediante una comparación de los datos históricos de dichos modelos con los datos medidos en el área de estudio para determinar cuál modelo

representaba mejor el comportamiento de los datos medidos. Es importante señalar que para esta selección se tomaron en cuenta los 19 modelos climáticos de circulación global presentados en la página del *WorldClim*, correspondientes al CMIP5. Se utilizó la página del *Climate Explorer* para obtener los datos de dichos modelos, esta página genera los resultados de los modelos en una grilla de 0.5° x 0.5° para un área seleccionada por el usuario. Estos datos pueden extraerse en formato ASCII y luego ser copiados en un formato TXT para llevarse a un archivo de Excel y trabajar con mayor facilidad.

Para efectos de este trabajo los datos históricos analizados para los modelos corresponden al período 1975-1987, el cual era un período común con los datos medidos en el área de estudio. Por otro lado, se definió la cuadrícula dentro de la cual se generarían los datos de precipitación de la zona mediante la página del *Climate Explorer* para el período mencionado; en este caso la cuadrícula tuvo como coordenadas Norte 9.4° a 10° y Este -69.8° a -69.1°, abarcando el área donde se encontraban las estaciones de medición.

Posteriormente, tal como lo indica Vásquez (2019) una vez generada la información de precipitación con la página del *Climate Explorer* se determinó el coeficiente de correlación entre el promedio de los datos históricos medidos, el cual se obtuvo de una estación promedio creada a partir de las estaciones climáticas consideradas, y los datos históricos obtenidos para cada uno de los 19 modelos usados. En la Tabla 4.11 se pueden observar los coeficientes de correlación obtenidos para cada uno de los modelos.

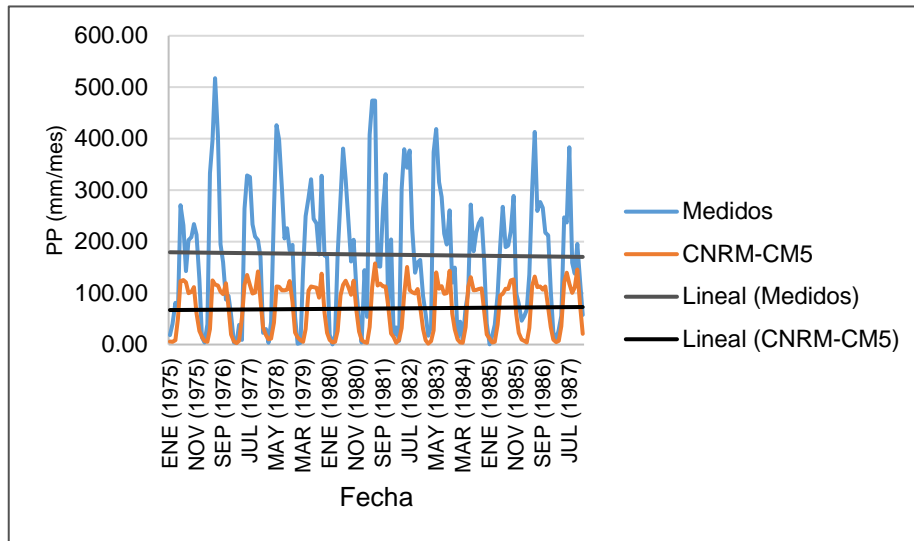
Tabla 4.11. Coeficiente de correlación entre el promedio de los datos medidos y los datos históricos de los modelos climáticos

Coeficiente de correlación entre el promedio de los datos medidos y los datos históricos de los modelos climáticos	
Modelo	Coeficiente de correlación
BCC-CSM1.1	0.44
CNRM-CM5	0.75
ACCESS1.0	0.65
INM-CM4.0	0.60
IPSL-CM5A-LR	0.37
MIROC-ESM	0.67
MIROC-ESM-CHEM	0.61

Coeficiente de correlación entre el promedio de los datos medidos y los datos históricos de los modelos climáticos	
Modelo	Coeficiente de correlación
MIROC5	0.74
HadGEM2-CC	0.57
HadGEM2-ES	0.70
MPI-ESM-LR	0.73
MRI-CGCM3	0.51
GISS-E2-Rp1	0.71
CCSM4	0.47
CESM1(CAM5.1.FV2)	0.57
NorESM1-M	0.57
HadGEM2-AO	0.41
GFDL-CM3	0.53
GFDL-E2M2G	0.39

Fuente: Propia.

De manera general, una vez identificados los modelos con mejor coeficiente de correlación se procedió a graficar los valores de cada modelo, añadiendo la respectiva línea de tendencia a cada gráfico, para visualizar qué modelo representaba mejor los datos de precipitación del área de estudio. El modelo CNRM-CM5 con un coeficiente de correlación de 0.75, a pesar de no tener un buen ajuste en los valores máximos, fue escogido como el modelo que mejor representaba los datos medidos. En tal sentido, el modelo CNRM-CM5 fue el modelo utilizado para generar los datos para los períodos 1998-2022; 2023-2060 y 2061-2080. Dicho modelo se compone de varios modelos desarrollados independientemente unos de otros y acoplados a través del acoplador OASIS3, desarrollado en el *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique* (CERFACS). En la Figura 4.5 se presenta el gráfico obtenido para los datos históricos de precipitación (mm/mes) del modelo CNRM-CM5 versus los datos medidos de precipitación, con sus respectivas líneas de tendencia.



Fuente: Propia.

Figura 4.5. Valores medidos vs. valores históricos de precipitación del modelo CNRM-CM5

Es de notar que, en este trabajo se tomaron en cuenta dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero para realizar las modelaciones respectivas, un escenario intermedio correspondiente a un RCP de 4.5 y un escenario más desfavorable con un RCP de 8.5. No obstante, antes de llevar a cabo el proceso de modelación se hizo una comparación de los datos obtenidos en la página del *Climate Explorer* con los datos obtenidos en la página *WorldClim* para los años con que trabaja esta última página que son 2050 y 2070, considerando así el mismo período de años y modelo de circulación (que en este caso es el CNRM-CM5) tanto para el escenario con RCP 4.5 como para el escenario con RCP 8.5. Para ello, se descargaron los datos del CMIP5 correspondientes a los años 2050 (promedio de 2041-2060) y 2070 (promedio de 2061-2080) de la página del *WorldClim*, en formato GeoTIFF con la mayor resolución espacial ofrecida por el portal, la cual es de 30 segundos (de un grado de longitud/latitud), es decir, aproximadamente 1 km (900 m) en el Ecuador.

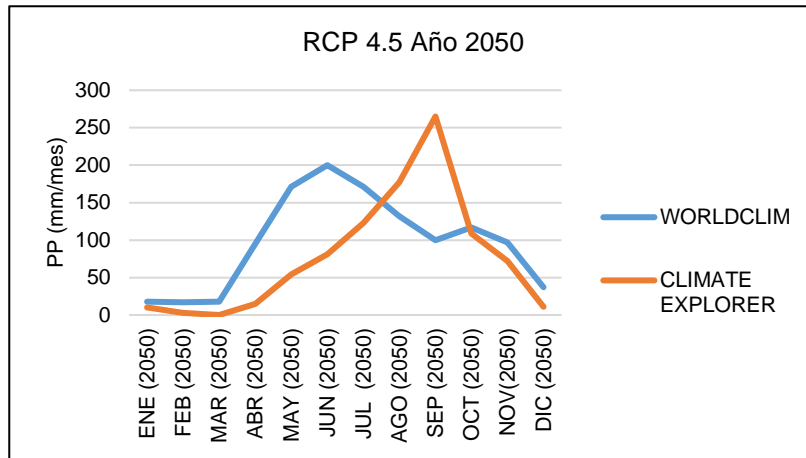
Luego, haciendo uso del programa ArcGis 10.1 se extrajeron los datos puntuales de precipitación en las coordenadas correspondientes a la ubicación de las distintas estaciones

climáticas usadas en este trabajo. Una vez extraídos estos datos se calculó un promedio para todas esas estaciones y se comparó con los datos obtenidos en el *Climate Explorer* para los mismos años (2050 y 2070) dentro de la cuadrícula con las coordenadas de latitud y longitud definidas anteriormente. Esta comparación como ya se mencionó se realizó para las rutas de concentración representativas (RCP) de 4.5 y 8.5. En las Tabla 4.12 - 4.15 se muestran los datos obtenidos de ambas páginas y en las Figura 4.6 - 4.9 se muestran los resultados para esta validación del *Climate Explorer*.

Tabla 4.12. Comparación de los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo seleccionado (RCP 4.5 - Año 2050)

Comparación de los datos de precipitación (mm/mes) del <i>WorldClim</i> y del <i>Climate Explorer</i> para el modelo CNRM-CM5		
RCP 4.5 AÑO 2050		
Tiempo	<i>WorldClim</i>	<i>Climate Explorer</i>
Ene (2050)	18	10
Feb (2050)	17	3
Mar (2050)	18	0
Abr (2050)	95	15
May (2050)	171	54
Jun (2050)	200	81
Jul (2050)	171	123
Ago (2050)	132	177
Sep (2050)	100	265
Oct (2050)	117	109
Nov(2050)	97	72
Dic (2050)	37	11

Fuente: Propia.



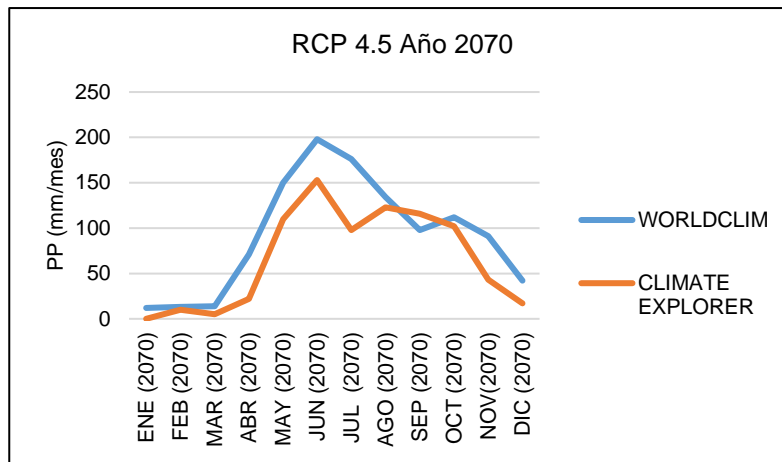
Fuente: Propia.

Figura 4.6. Gráfico de comparación entre los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo CNRM-CM5 (RCP 4.5 - Año 2050).

Tabla 4.13. Comparación de los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo seleccionado (RCP 4.5 - Año 2070)

Comparación de los datos de precipitación (mm/mes) del <i>WorldClim</i> y del <i>Climate Explorer</i> para el modelo CNRM-CM5		
RCP 4.5 AÑO 2070		
Tiempo	<i>WorldClim</i>	<i>Climate Explorer</i>
Ene (2070)	12	0
Feb (2070)	13	10
Mar (2070)	14	5
Abr (2070)	71	22
May (2070)	150	110
Jun (2070)	198	153
Jul (2070)	176	98
Ago (2070)	134	123
Sep (2070)	98	116
Oct (2070)	112	102
Nov(2070)	91	43
Dic (2070)	42	17

Fuente: Propia.



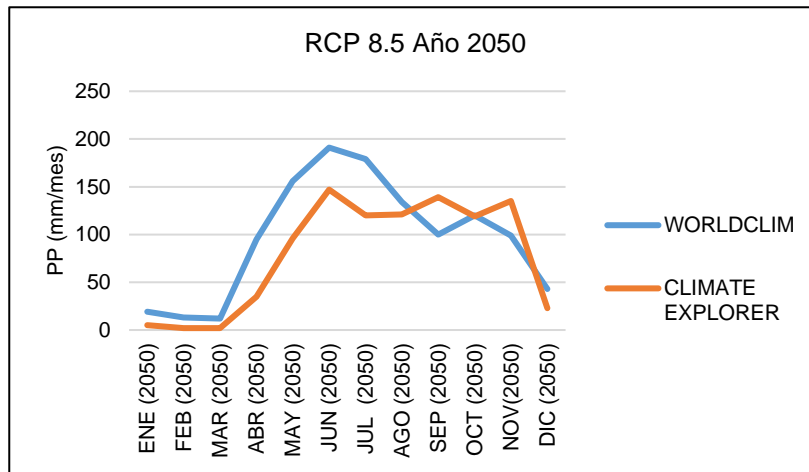
Fuente: Propia.

Figura 4.7. Gráfico de comparación entre los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo CNRM-CM5 (RCP 4.5 - Año 2070).

Tabla 4.14. Comparación de los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo seleccionado (RCP 8.5 - Año 2050)

Comparación de los datos de precipitación (mm/mes) del <i>WorldClim</i> y del <i>Climate Explorer</i> para el modelo CNRM-CM5		
RCP 8.5 AÑO 2050		
Tiempo	<i>WorldClim</i>	<i>Climate Explorer</i>
Ene (2050)	19	5
Feb (2050)	13	2
Mar (2050)	12	2
Abr (2050)	95	35
May (2050)	156	96
Jun (2050)	191	147
Jul (2050)	179	120
Ago (2050)	134	121
Sep (2050)	100	139
Oct (2050)	120	119
Nov(2050)	99	135
Dic (2050)	43	23

Fuente: Propia.



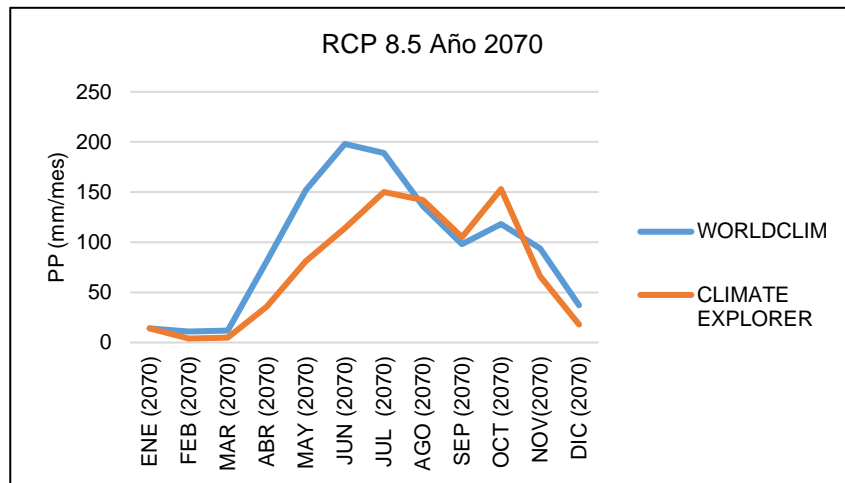
Fuente: Propia.

Figura 4.8. Gráfico de comparación entre los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo CNRM-CM5 (RCP 8.5 - Año 2050).

Tabla 4.15. Comparación de los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo seleccionado (RCP 8.5 - Año 2070)

Comparación de los datos de precipitación (mm/mes) del <i>WorldClim</i> y del <i>Climate Explorer</i> para el modelo CNRM-CM5		
RCP 8.5 AÑO 2070		
Tiempo	<i>WorldClim</i>	<i>Climate Explorer</i>
Ene (2070)	14	14
Feb (2070)	11	4
Mar (2070)	12	5
Abr (2070)	81	36
May (2070)	152	81
Jun (2070)	198	114
Jul (2070)	189	150
Ago (2070)	136	142
Sep (2070)	98	105
Oct (2070)	118	153
Nov(2070)	94	66
Dic (2070)	37	18

Fuente: Propia.



Fuente: Propia.

Figura 4.9. Gráfico de comparación entre los datos de precipitación del WorldClim y del Climate Explorer para el modelo CNRM-CM5 (RCP 8.5 - Año 2070).

En los gráficos anteriores se observa que tanto la serie de datos del *WorldClim* como la serie de datos del *Climate Explorer* para el modelo CNRM-CM5 tienen formas bastante similares. Para cada uno de esos gráficos se determinó el coeficiente de correlación entre las dos series de datos, obteniendo para el RCP 4.5 año 2050 un coeficiente de correlación de 0.49; para el RCP 4.5 año 2070 un coeficiente de correlación de 0.91; para el RCP 8.5 año 2050 un coeficiente de correlación de 0.85 y para el RCP 8.5 año 2070 un coeficiente de correlación de 0.86. De esta manera se validó el uso del *Climate Explorer* puesto que en general los coeficientes de correlación son altos y los gráficos tienen una tendencia similar.

Por otro lado, como lo señalan Gualán *et al.* (2014) los resultados de los modelos globales de clima (GCM: *Global Climate Models*), son las herramientas más avanzadas al momento para evaluar los cambios de patrones del clima futuro. Generalmente la resolución de los GCMs es muy baja (píxeles de por lo menos 100x100 km), lo cual limita su aplicabilidad para estudios de impacto del cambio climático y su correspondiente efecto en diversos componentes de los ecosistemas, como el ciclo hidrológico. De allí surge la necesidad de aplicar técnicas de reducción de escala (*downscaling* en inglés), que permiten aumentar la resolución de las variables climáticas inclusive a nivel de punto o estación. Por lo cual, en este trabajo se utilizó la metodología desarrollada por Vásquez (2019) para reducir la escala

de los datos de precipitación obtenidos de la página *Climate Explorer*. Dicha metodología consistió en calcular un factor multiplicador que relaciona mes a mes cada estación con el promedio del modelo climático de circulación utilizado, que en este caso fue el modelo CNRM-CM5.

Este proceso de reducción de escala para los datos de precipitación obtenidos con el *Climate Explorer* se llevó a cabo para distintos períodos de tiempo y teniendo en cuenta el RCP 4.5 y el RCP 8.5. Primero se realizó usando los datos históricos como base para la reducción de escala y posterior simulación de la recarga hasta el año 2022. Luego usando como base los datos obtenidos con el *WorldClim* para el año 2050 (RCP 4.5 y RCP 8.5), con lo cual luego se simularía la recarga del acuífero para el período 2023-2060. Y finalmente, usando como base los datos obtenidos con el *WorldClim* para el año 2070 (RCP 4.5 y RCP 8.5), con lo cual se simularía la recarga del acuífero para el período 2061-2080.

4.3.3.1. Reducción de la escala a partir de datos históricos

En la reducción de la escala tomando como base los datos históricos medidos en cada estación climática se obtuvo un factor por el cual se multiplicaron los datos obtenidos con el *Climate Explorer* para el modelo CNRM-CM5 hasta el año 2022 (RCP 4.5), dando como resultado una estimación de los valores de precipitación para cada estación usada en este trabajo. En tal sentido, lo primero que se hizo fue considerar un período en común para las estaciones el cual fue 1975-1997, es decir, 23 años de registro. Igualmente, se consideró el mismo período para los datos del modelo CNRM-CM5 obtenidos con el *Climate Explorer*. Teniendo estos períodos se calculó el promedio mensual para todos esos años y luego se dividió el promedio de cada mes de cada estación entre el promedio mensual obtenido para el modelo CNRM-CM5 en el período 1975-1997. De esta forma se obtuvieron los factores multiplicadores mostrados en la Tabla 4.16, con los cuales se pudo obtener los datos de precipitación de cada estación que a su vez servirían para estimar la recarga del acuífero para el período 1998-2022 en el programa SIHIM.

Tabla 4.16. Factores multiplicadores para el período 1998-2022 del modelo CNRM-CM5

Factores multiplicadores obtenidos para el período 1998-2022 del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	0.762	0.955	2.039	1.450	1.862	2.302	1.306	2.554
Febrero	3.658	5.489	10.769	9.090	9.251	9.123	6.376	11.085
Marzo	5.366	4.981	9.239	8.462	7.039	7.259	6.197	9.655
Abril	4.169	4.277	5.254	5.455	5.728	4.784	5.372	6.219
Mayo	2.575	2.260	2.843	2.613	2.697	2.139	2.764	2.915
Junio	2.845	2.449	2.999	2.507	2.932	2.196	3.411	3.471
Julio	2.390	2.011	2.634	2.091	2.469	1.822	2.891	2.956
Agosto	2.121	1.870	1.910	1.861	2.165	1.509	2.622	2.250
Septiembre	1.923	1.837	1.695	1.946	2.056	1.463	2.581	2.076
Octubre	2.002	1.727	1.765	1.729	1.976	1.399	1.997	1.648
Noviembre	1.846	1.699	2.012	2.085	2.377	1.670	2.170	2.349
Diciembre	2.653	2.585	4.046	3.145	3.555	2.714	3.688	5.090

Fuente: Propia.

4.3.3.2. Reducción de la escala a partir de datos futuros

En la reducción de la escala tomando como base los datos futuros obtenidos con el *WorldClim* para el año 2050 en cada estación utilizada en este trabajo, se obtuvo un factor por el cual se multiplicaron los datos obtenidos con el *Climate Explorer* para el modelo CNRM-CM5 en el período 2023-2060 (RCP 4.5 y RCP 8.5), dando como resultado una estimación de los valores de precipitación en el período 2023-2060 para cada estación. Para ello, se consideraron los datos del *WorldClim* de cada estación para el año 2050 y para los RCP 4.5 y 8.5 respectivamente. Además, se consideró el período 2041-2060 para los datos del modelo CNRM-CM5 obtenidos con el *Climate Explorer* y se calculó el promedio mensual para todos esos años y luego se dividió el dato del *WorldClim* de cada mes de cada estación entre el promedio mensual obtenido para el modelo CNRM-CM5 en el período 2041-2060.

De esta forma se obtuvieron los factores multiplicadores mostrados en la Tabla 4.17 y la Tabla 4.18, con los cuales se pudo obtener los datos de precipitación de cada estación para el período 2023-2060 que a su vez servirían para estimar la recarga del acuífero en el programa SIHIM para el período 2023-2060.

Tabla 4.17. Factores multiplicadores para el período 2023-2060 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2023-2060 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	1.185	1.481	3.851	2.222	3.258	3.258	2.962	3.110
Febrero	1.986	1.986	4.369	3.177	3.972	4.170	3.177	3.376
Marzo	1.840	1.380	2.530	1.725	2.530	2.760	1.840	2.070
Abril	2.190	1.706	2.374	1.890	2.443	2.213	2.512	2.120
Mayo	1.650	1.221	1.287	1.295	1.444	1.196	1.840	1.337
Junio	1.861	1.095	1.325	1.318	1.683	1.288	1.928	1.392
Julio	1.717	1.170	1.236	1.286	1.584	1.194	1.850	1.327
Agosto	1.507	0.938	0.862	1.021	1.172	0.921	1.407	0.996
Septiembre	1.215	0.657	0.757	0.699	0.832	0.666	1.073	0.765
Octubre	1.362	0.819	0.886	0.911	0.969	0.852	1.128	0.886
Noviembre	1.270	1.063	1.339	1.270	1.477	1.367	1.546	1.367
Diciembre	1.478	1.833	2.365	2.188	2.424	2.365	2.543	2.247

Fuente: Propia.

Tabla 4.18. Factores multiplicadores para el período 2023-2060 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2023-2060 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	1.112	1.359	3.459	1.977	2.965	2.842	2.595	2.718
Febrero	2.094	2.094	4.450	3.141	4.188	4.188	3.141	3.403
Marzo	2.796	1.957	3.915	2.796	4.194	4.474	2.796	3.355
Abril	2.282	1.778	2.498	1.970	2.570	2.330	2.618	2.234
Mayo	1.668	1.244	1.318	1.327	1.483	1.225	1.852	1.354
Junio	1.892	1.120	1.341	1.333	1.687	1.285	1.987	1.419
Julio	1.681	1.139	1.209	1.255	1.549	1.170	1.797	1.294
Agosto	1.545	0.976	0.891	1.052	1.205	0.942	1.451	1.027
Septiembre	1.237	0.665	0.776	0.725	0.862	0.691	1.092	0.785
Octubre	1.350	0.809	0.881	0.906	0.962	0.849	1.116	0.881
Noviembre	1.284	1.065	1.352	1.284	1.489	1.380	1.571	1.380
Diciembre	1.359	1.687	2.156	1.968	2.250	2.156	2.390	2.062

Fuente: Propia.

Del mismo modo, en la reducción de la escala tomando como base los datos futuros obtenidos con el *WorldClim* para el año 2070 en cada estación utilizada en este trabajo, se obtuvo un factor por el cual se multiplicaron los datos obtenidos con el *Climate Explorer* para el modelo CNRM-CM5 en el período 2061-2080 (RCP 4.5 y RCP 8.5), dando como resultado una estimación de los valores de precipitación en el período 2061-2080 para cada estación. Lo anterior se realizó considerando los datos del *WorldClim* de cada estación para el año 2070 y para los RCP 4.5 y 8.5, respectivamente. Asimismo, se consideró el período 2061-2080 para los datos del modelo CNRM-CM5 obtenidos con el *Climate Explorer* y se calculó el promedio mensual para todos esos años y luego se dividió el dato del *WorldClim* de cada mes de cada estación entre el promedio mensual obtenido para el modelo CNRM-CM5 en el período 2061-2080.

Obteniendo finalmente los factores multiplicadores mostrados en la Tabla 4.19 y la Tabla 4.20, con los cuales se pudo obtener los datos de precipitación de cada estación que a su vez servirían para estimar la recarga del acuífero en el programa SIHIM para el período 2061-2080.

Tabla 4.19. Factores multiplicadores para el período 2061-2080 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2061-2080 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	1.287	1.501	3.646	2.145	3.217	3.003	2.788	3.003
Febrero	2.136	2.136	4.273	3.205	4.006	4.273	3.205	3.472
Marzo	1.898	1.424	2.848	1.898	2.848	3.006	1.898	2.215
Abril	2.252	1.770	2.542	1.995	2.606	2.381	2.574	2.220
Mayo	1.665	1.235	1.321	1.330	1.493	1.244	1.828	1.359
Junio	1.917	1.133	1.366	1.358	1.723	1.319	2.002	1.443
Julio	1.684	1.141	1.204	1.259	1.542	1.172	1.809	1.290
Agosto	1.520	0.955	0.872	1.030	1.179	0.922	1.420	1.005
Septiembre	1.196	0.644	0.744	0.694	0.828	0.652	1.045	0.753
Octubre	1.417	0.856	0.939	0.966	1.031	0.911	1.178	0.939
Noviembre	1.356	1.135	1.435	1.356	1.577	1.451	1.656	1.451
Diciembre	1.448	1.748	2.247	2.097	2.347	2.247	2.497	2.147

Fuente: Propia.

Tabla 4.20. Factores multiplicadores para el período 2061-2080 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2061-2080 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	1.167	1.334	3.502	2.001	3.002	2.835	2.668	2.668
Febrero	2.611	2.611	5.221	3.730	4.848	4.848	3.730	4.102
Marzo	1.922	1.538	2.883	1.922	2.883	3.268	1.922	2.307
Abril	2.194	1.679	2.383	1.896	2.465	2.248	2.492	2.113
Mayo	1.661	1.229	1.314	1.323	1.483	1.239	1.830	1.351
Junio	1.871	1.105	1.315	1.308	1.661	1.270	1.954	1.398
Julio	1.703	1.160	1.219	1.271	1.569	1.182	1.829	1.309
Agosto	1.541	0.975	0.883	1.050	1.200	0.933	1.450	1.025
Septiembre	1.223	0.659	0.761	0.710	0.847	0.676	1.078	0.779
Octubre	1.353	0.808	0.883	0.907	0.965	0.850	1.114	0.874
Noviembre	1.290	1.075	1.347	1.275	1.490	1.376	1.576	1.376
Diciembre	1.410	1.749	2.257	2.087	2.313	2.257	2.426	2.144

Fuente: Propia.

4.3.3.3. Estimación de la recarga natural considerando condiciones de cambio climático

Una vez obtenidos los valores de precipitación y evaporación para todas las estaciones en los períodos deseados, para el modelo CNRM-CM5 y teniendo en cuenta los RCP 4.5 y 8.5 respectivamente, se realizó la estimación de la recarga natural al acuífero con el programa SIHIM.

Dicha estimación se hizo para varios períodos de tiempo, un período histórico que va desde el año 1998 hasta el año 2022 y dos períodos futuros, 2023-2060 y 2061-2080, los cuales se simularon tanto para el RCP 4.5 como para el RCP 8.5.

Los valores obtenidos de la recarga simulada para los períodos mencionados anteriormente, que corresponden al valor del flujo subterráneo efluente generado en el SIHIM, se pueden resumir como sigue:

Recarga simulada total para el período 1998 - 2022:

Se obtuvo un flujo subterráneo efluente total de 1229.9420 millones de m³ (Mm³). Lo cual representa un valor de recarga de 1.56 m³/s o una lámina de aproximadamente 1396.53 mm

de recarga al acuífero para el período 1998-2022 a partir de los datos del modelo CNRM-CM5. Es importante señalar que, para esta simulación se consideró un RCP 4.5, el cual representa de acuerdo con el IPCC (2014), un escenario intermedio de concentración de gases de efecto invernadero; por lo que se tomó en cuenta para simular la condición histórica del área estudiada.

Recarga simulada total para el período 2023 – 2060, RCP 4.5:

En este caso, se obtuvo un flujo subterráneo efluente total de 1165.7500 millones de m³ (Mm³). Lo cual representa un valor de recarga de 0.97 m³/s o una lámina de aproximadamente 1323.65 mm de recarga al acuífero para el período 2023-2060 (RCP 4.5) a partir de los datos del modelo CNRM-CM5.

Recarga simulada total para el período 2023 – 2060, RCP 8.5:

El flujo subterráneo efluente total obtenido fue de 1270.7720 millones de m³ (Mm³). Lo cual representa un valor de recarga de 1.06 m³/s o una lámina de aproximadamente 1442.90 mm de recarga al acuífero para el período 2023-2060 (RCP 8.5) a partir de los datos del modelo CNRM-CM5.

Recarga simulada total para el período 2061 – 2080, RCP 4.5:

Se obtuvo un flujo subterráneo efluente total de 607.3063 millones de m³ (Mm³). Lo cual representa un valor de recarga de 0.96 m³/s o una lámina de aproximadamente 689.56 mm de recarga al acuífero para el período 2061-2080 (RCP 4.5) a partir de los datos del modelo CNRM-CM5.

Recarga simulada total para el período 2061 – 2080, RCP 8.5:

El flujo subterráneo efluente total obtenido fue de 631.5143 millones de m³ (Mm³). Lo cual representa un valor de recarga de 1.001 m³/s o una lámina de aproximadamente 717.05 mm de recarga al acuífero para el período 2061-2080 (RCP 8.5) a partir de los datos del modelo CNRM-CM5.

CAPÍTULO 5. ESTIMACIÓN DE LAS RESERVAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

En este capítulo se muestran las actividades realizadas para poder estimar las reservas de agua subterránea en el área de estudio con fines de riego. A continuación, se describen cada una de ellas.

5.1. Elaboración del mapa piezométrico

Para la realización del mapa piezométrico, se calculó la cota piezométrica de cada pozo a través de la Ec. 5.1, con el fin de conocer la dirección del flujo del agua en la zona de estudio (ver la Tabla 5.1).

$$NP = C - NF \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde:

NP = nivel piezométrico

C = cota del terreno (m.s.n.m)

NF = profundidad del nivel freático (m)

www.bdigital.ula.ve

Tabla 5.1. Cota piezométrica para cada pozo

Datos para la realización del mapa piezométrico del área de estudio						
Nombre del pozo	Número del pozo	Norte (m)	Este (m)	Cota Topográfica (m)	Prof. Nivel de agua (m)	Cota piezométrica (m)
PO5567003A	1	1002234.59	492673.45	92.07	2.56	89.51
PO5567004A	2	1002234.09	496336.73	95.14	0.35	94.79
PO5567006A	3	1011447.57	494506.36	98.77	2.33	96.44
PO5567007A	4	1011449.90	485350.29	99.00	0.98	98.02
PO5567008A	5	1009607.24	485349.61	101.50	1.60	99.90
PO5567010A	6	1007762.93	490843.09	99.36	2.32	97.04
PO5665005A	9	1027114.35	518762.46	95.70	3.15	92.55
PO5666008A	13	1016975.34	503661.91	114.70	1.50	113.20
PO5666009C	14	1018818.21	505492.61	107.32	0.67	106.65
PO5667001A	15	1029875.40	489017.89	127.98	10.00	117.98
PO5667002A	16	1029873.85	500000.00	129.97	3.00	126.97
PO5667004A	18	1022506.63	483523.71	121.20	1.15	120.05
PO5668001A	21	1029878.16	481696.46	131.17	1.70	129.47
PO5668002A	22	1024353.08	476202.00	125.78	1.20	124.58

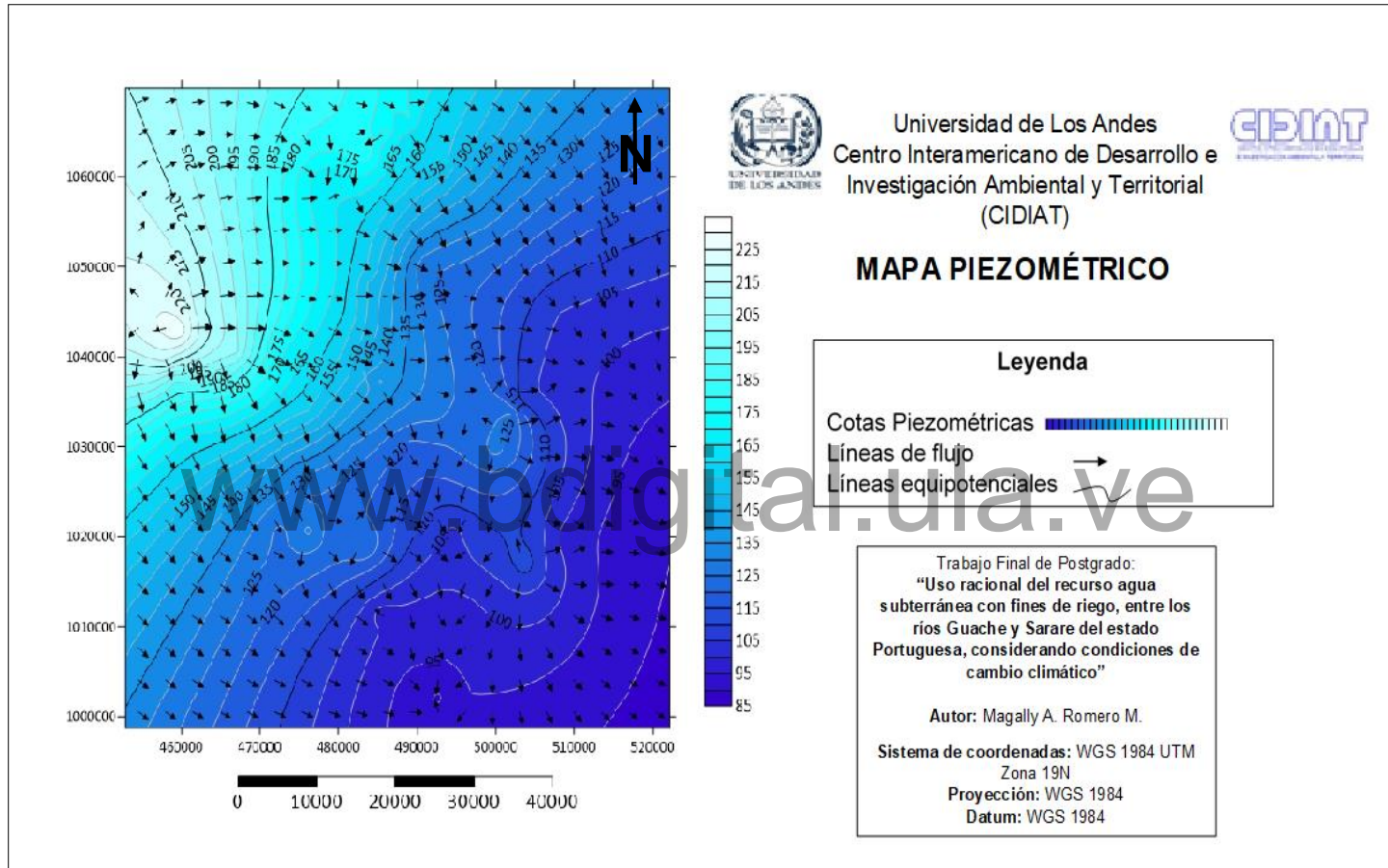
Datos para la realización del mapa piezométrico del área de estudio						
Nombre del pozo	Número del pozo	Norte (m)	Este (m)	Cota Topográfica (m)	Prof. Nivel de agua (m)	Cota piezométrica (m)
PO5668003A	23	1028039.60	474373.80	137.64	2.65	134.99
PO5668005A	25	1020670.11	472538.16	129.71	6.00	123.71
PO5668007A	27	1020665.66	479861.35	122.20	1.80	120.40
PO5668008A	28	1020667.72	476199.76	135.30	4.00	131.30
PO5766002A	29	1045537.34	507318.44	107.06	1.20	105.86
PO5766003A	30	1035402.05	503660.18	107.25	0.66	106.59
PO5766004A	31	1033559.24	501830.18	126.72	1.40	125.32
PO5767004C	35	1037708.88	483225.15	147.14	1.30	145.84
PO5767005A	36	1037708.68	483682.65	141.79	4.62	137.17
PO5767006A	37	1037399.76	488715.02	137.54	3.75	133.79
PO5767009A	38	1037523.74	485360.07	142.34	3.00	139.34
PO5767010A	39	1032023.67	498322.27	125.62	2.62	123.00
PO5768004A	42	1044926.85	481551.13	162.88	5.00	157.88
PO5768006A	44	1048613.18	479723.44	169.59	4.80	164.79
PO5768007A	45	1034027.18	476207.92	158.30	3.30	155.00
PO5768020C	46	1040636.91	467062.69	204.33	3.87	200.46
PO5769003A	47	1045155.76	462492.42	216.25	4.97	211.28
PO5769004A	48	1031737.42	459733.91	168.48	0.46	168.02
PO5867001A	50	1062431.63	483540.83	183.45	5.15	178.30
PO5867002A	51	1064887.82	485370.59	174.95	6.72	168.23
PO5867003A	52	1065102.55	486041.18	181.40	5.00	176.40
PO5867005A	54	1064887.16	487199.27	171.35	5.40	165.95
PO5867008A	56	1066729.29	489028.48	173.81	3.55	170.26
PO5867010A	58	1060892.87	494360.99	160.02	6.00	154.02
PO5867012A	59	1059357.57	492684.22	154.29	4.50	149.79
PO5867015A	62	1050144.47	490853.06	128.93	2.47	126.46
PO5868001A	63	1059363.24	478052.64	177.16	12.20	164.96
PO5767003A	68	1049839.55	484145.16	157.15	3.37	153.78
PO5769002A	70	1037573.32	459129.98	203.45	12.00	191.45
PO5767007A	71	1033559.95	492374.26	132.27	6.00	126.27
PO5767008A	72	1031870.47	494509.23	123.82	1.85	121.97
PO5666004A	73	1020047.30	508970.98	101.95	4.23	97.72
PO5666011A	75	1019279.56	509154.24	100.88	2.96	97.92
PO5666012A	76	1015808.18	501647.91	109.31	2.63	106.68
PO5567005A	77	1005919.39	496337.07	97.51	1.25	96.26
PO5667006A	78	1018821.28	483522.16	126.00	1.85	124.15
PO5667008A	79	1020660.88	494507.65	108.00	4.00	104.00
PO5667009A	80	1016975.34	496338.09	107.00	2.80	104.20
PO5767011A	81	1040929.97	498170.17	122.22	3.00	119.22
PO5767012A	82	1046458.38	494511.31	128.63	6.00	122.63
PO5767014A	84	1048304.23	483534.70	155.45	5.00	150.45
PO5767015A	86	1037247.33	485359.96	142.65	2.00	140.65
PO5768008A	87	1040939.72	472552.49	175.56	4.00	171.56
PO5769010A	95	1039110.23	457911.64	218.85	6.00	212.85

Datos para la realización del mapa piezométrico del área de estudio						
Nombre del pozo	Número del pozo	Norte (m)	Este (m)	Cota Topográfica (m)	Prof. Nivel de agua (m)	Cota piezométrica (m)
PO5769012A	98	1042793.72	459745.45	238.66	10.00	228.66
PO5867016A	99	1056439.32	497713.64	136.86	1.00	135.86
PO5867018A	101	1060739.29	494513.37	151.79	3.50	148.29
PO5867023A	106	1066729.87	487199.89	175.87	6.50	169.37
PO5867025A	108	1063045.11	485369.87	172.82	3.00	169.82
PO5867026A	109	1063966.47	485370.23	176.17	5.00	171.17
PO5867027A	110	1063966.71	484760.65	178.61	6.00	172.61
PO5867028A	111	1064274.08	484151.21	180.14	3.50	176.64
PO5867033A	112	1066728.87	490552.31	167.34	3.50	163.84
PO5867034A	113	1066728.95	490247.54	170.08	4.00	166.08
PO5867035A	114	1066421.68	490857.00	167.94	6.00	161.94

Fuente: modificado de SIGATLAS (2004).

Luego, se procedió a crear un archivo en el programa Surfer 15.0 con la información de las coordenadas UTM y la cotas piezométricas calculadas para posteriormente generar el mapa piezométrico, el cual se muestra en la Figura 5.1.

En dicho mapa piezométrico se observa que las líneas de flujo se orientan hacia el manto acuífero, de forma general, en dirección noroeste – sureste. Las líneas equipotenciales están representadas cada 10 m, la de menor cota es 85 m.s.n.m. y la de mayor cota es 225 m.s.n.m. Es importante señalar que, donde las líneas equipotenciales están cerradas puede deberse a la topografía del terreno en esa área.



Fuente: Propia.

Figura 5.1. Mapa piezométrico del área de estudio.

Reconocimiento

5.2. Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero

Posterior a la obtención del mapa piezométrico, se procedió a la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero a través de los siguientes pasos:

5.2.1. Elaboración de los perfiles litológicos

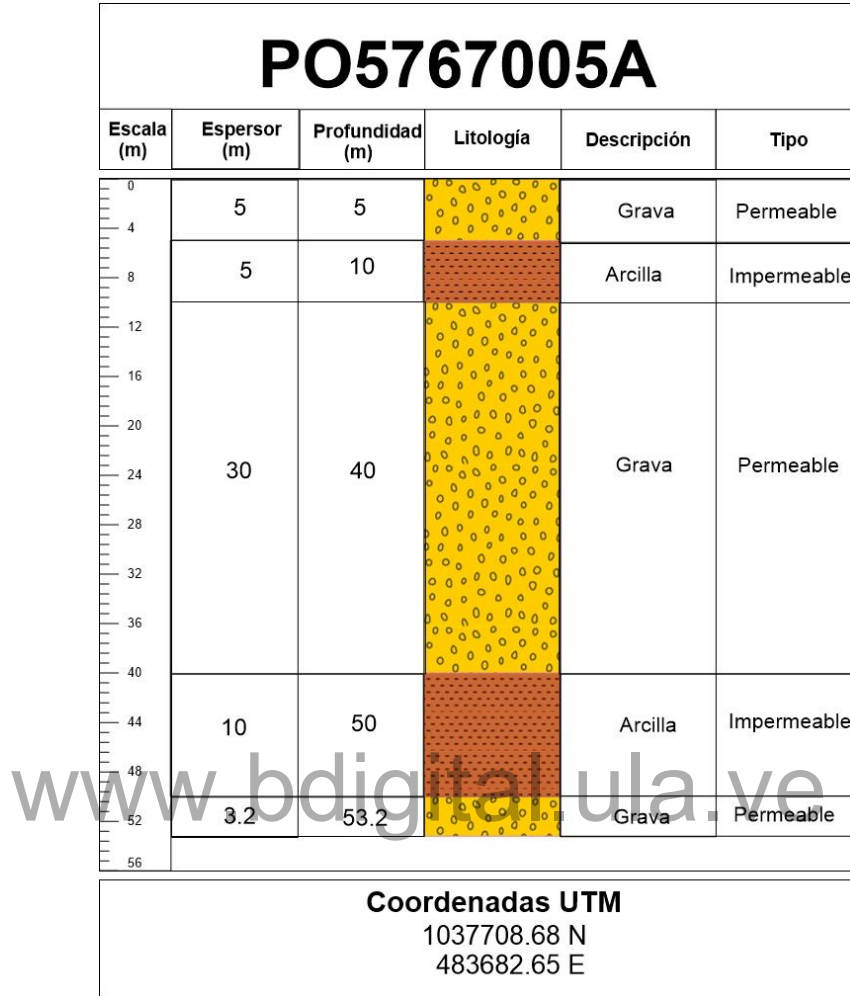
Se crearon los perfiles litológicos a través del programa *Strater 5*. Para ello, en primer lugar, se creó una tabla con los parámetros que exige el programa al momento de crear la columna litológica. Como ejemplo, en la Tabla 5.2 se observan los parámetros utilizados para la creación del perfil N° 1.

Tabla 5.2. Litologías para la creación del perfil N° 1

Datos litológicos para crear el perfil N° 1					
Nombre del pozo	Desde (m)	Hasta (m)	Litología	Palabra clave	Escala
PO5767005A	0	5	GRAVA	RECTO	10
PO5767005A	5	10	ARCILLA	RECTO	10
PO5767005A	10	40	GRAVA	RECTO	10
PO5767005A	40	50	ARCILLA	RECTO	10
PO5767005A	50	53.2	GRAVA	RECTO	10

Fuente: Propia.

Posteriormente, se editan los colores y la trama correspondiente a cada litología capa por capa, debido a que el programa asigna colores aleatorios al crear el perfil. Finalmente, se realizan los arreglos correspondientes para exportarla como imagen. El perfil N° 1 creado de esta manera, que para el caso de este estudio corresponde al pozo PO57670005A, se muestra en la Figura 5.2. El procedimiento descrito anteriormente se realizó para todos los perfiles litológicos; en el Apéndice A de este trabajo se muestran los perfiles restantes.



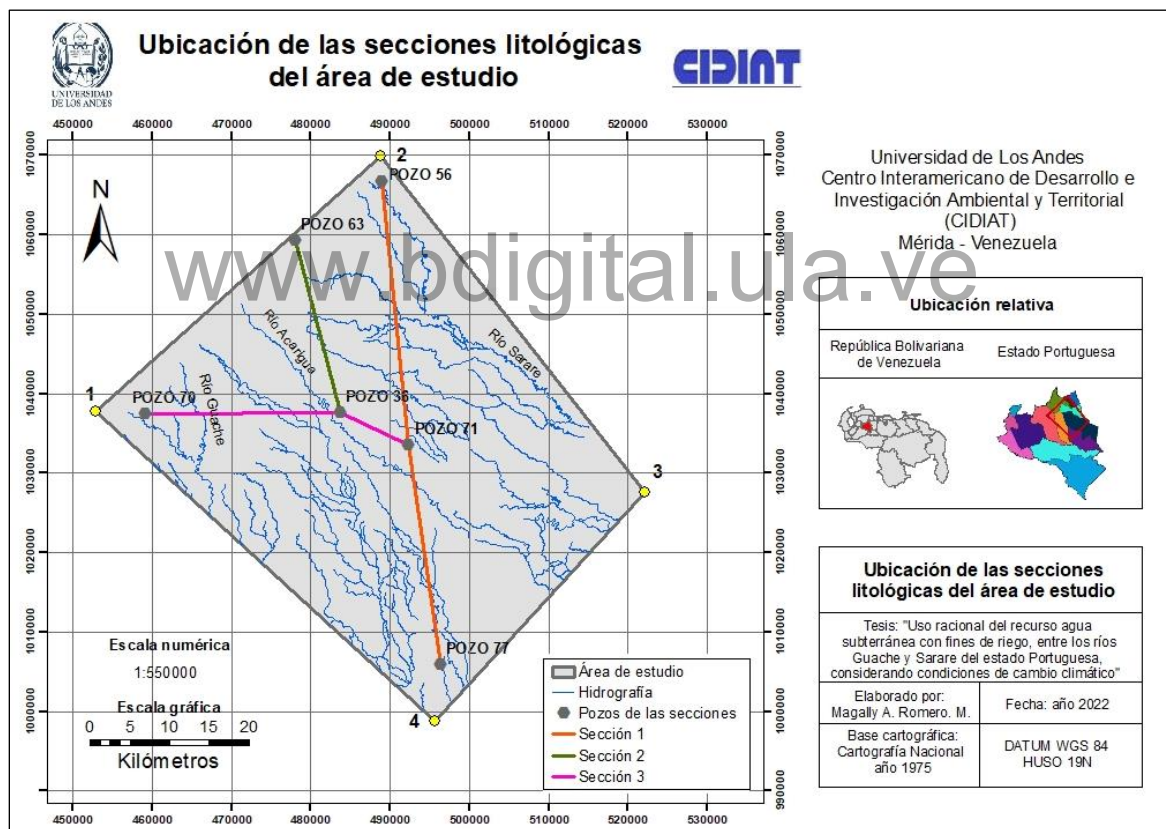
Fuente: Propia.

Figura 5.2. Perfil litológico N° 1.

5.2.2. Elaboración de las secciones litológicas

Las secciones litológicas del área de estudio se elaboraron tratando de abarcar la mayor extensión posible del área, considerando la distribución de aquellos pozos que contenían información litológica detallada. Es importante tener en cuenta que se tomó como *datum* de referencia la cota topográfica de cada perfil que conformaban las distintas secciones y así tener una adecuada visualización e interpretación de la geología del subsuelo.

Por otro lado, tal como lo señala Mejías (2005), los programas utilizados para la elaboración de mapas a partir de la base de datos creada tienen una limitante; ésta es que las capas no pueden desaparecer, es decir, que cada una de éstas debe existir en toda el área de estudio, hecho que en la realidad no siempre se cumple, más aún en una planicie aluvial en donde es frecuente encontrar, por ejemplo, lentes de arcilla. Debido a esta limitante fue necesario colocar un espesor mínimo de un metro en las zonas donde una capa desaparecía. Esto con el propósito de respetar el principio de horizontalidad original y así poder analizar correctamente cada sección. Para el caso de este estudio, se realizaron tres secciones geológicas cuya ubicación espacial se muestra en la Figura 5.3.



Fuente: Propia.

Figura 5.3. Ubicación de las secciones litológicas en el área de estudio.

Estas secciones geológicas se digitalizaron utilizando el programa *Strater 5*, para ello en primer lugar se realizaron dos tablas, en donde estaban reflejados los parámetros que exige el programa; una tabla contiene la litología de cada perfil que compone la sección respectiva, y la otra tabla muestra las coordenadas UTM y la cota topográfica de los perfiles que componen la sección en cuestión. A manera de ejemplo, se muestran la Tabla 5.3 y la Tabla 5.4 que se emplearon para elaborar la sección 1.

Tabla 5.3. Litologías usadas para elaborar la sección 1

Datos litológicos para la elaboración de la sección N° 1			
Nombre del pozo	Desde (m)	Hasta (m)	Unidad litológica
PO5867008A	0	1	ARCILLA
PO5867008A	1	2	GRAVA
PO5867008A	2	10	ARCILLA
PO5867008A	10	14	ARENA
PO5867008A	14	17	GRAVA
PO5867008A	17	23	ARCILLA
PO5867008A	23	33.6	GRAVA
PO5867008A	33.6	34.6	ARCILLA
PO5867008A	34.6	35.6	GRAVA
PO5767007A	0	1	ARCILLA
PO5767007A	1	2	GRAVA
PO5767007A	2	6	ARCILLA
PO5767007A	6	12	ARENA
PO5767007A	12	15	GRAVA
PO5767007A	15	16	ARCILLA
PO5767007A	16	48	GRAVA
PO5767007A	48	49	ARCILLA
PO5767007A	49	50	GRAVA
PO5567005A	0	1	ARCILLA
PO5567005A	1	2	GRAVA
PO5567005A	2	13	ARCILLA
PO5567005A	13	15	ARENA
PO5567005A	15	18	GRAVA
PO5567005A	18	19	ARCILLA
PO5567005A	19	34.87	GRAVA
PO5567005A	34.87	35.87	ARCILLA
PO5567005A	35.87	36.87	GRAVA

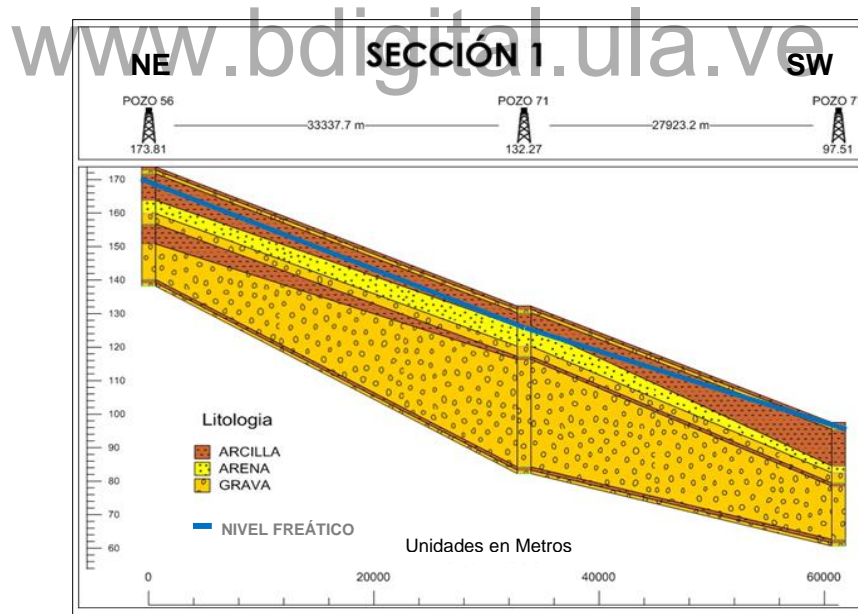
Fuente: Propia.

Tabla 5.4. Coordenadas UTM y profundidades para la sección 1

Datos de coordenadas y profundidades para la elaboración de la sección N° 1					
Nombre del pozo	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m.s.n.m)	Profundidad inicial (m)	Profundidad final (m)
PO5867008A	489028.48	1066729.29	175.87	0	60
PO5767007A	492374.26	1033559.95	127.1	0	60
PO5567005A	496337.07	1005919.39	95.71	0	60

Fuente: Propia.

De esa manera, luego de seleccionar el archivo que contenía las tablas con los parámetros para crear la sección, chequear cada uno de esos parámetros y ordenar los perfiles que componen la sección, se obtuvo la sección N° 1 sin editar, a la cual se le colocaron las tramas litológicas y los colores respectivos. Adicionalmente, se colocó cada perfil que compone la sección a la cota topográfica correspondiente (ver la Figura 5.4). Por último, se trazó el nivel freático obtenido anteriormente, quedando la sección como se muestra en la Figura 5.4. En el Apéndice B de este trabajo se muestran las secciones restantes.



Fuente: Propia.

Figura 5.4. Sección litológica N° 1.

5.2.3. Elaboración de mapas de contorno y superficies en 3D

Para la elaboración del modelo hidrogeológico del acuífero se usaron los programas ArcGis 10.1 y Surfer 15.0. No obstante, en primera instancia se realizó una tabla con las coordenadas UTM y la altitud de la base de las nueve capas definidas para el acuífero en estudio, tal como se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Cotas de las Bases de cada litología del modelo hidrogeológico

Datos de las cotas de las bases de cada litología del modelo											
Perfiles	Norte (m)	Este (m)	Cota base 1 (m)	Cota Base 2 (m)	Cota base 3 (m)	Cota base 4 (m)	Cota base 5 (m)	Cota base 6 (m)	Cota Base 7 (m)	Cota base 8 (m)	Cota base 9 (m)
1	1037708.68	483682.65	148.05	147.05	146.05	145.05	140.05	135.05	105.05	95.05	91.85
2	1066729.29	489028.48	174.87	173.87	165.87	161.87	158.87	152.87	142.27	141.27	140.27
3	1059363.24	478052.64	189.8	188.8	155.8	154.8	150.5	146.2	128.9	115.7	114.7
4	1037573.32	459129.98	200.47	178.47	176.47	175.47	135.47	132.47	131.47	130.47	129.47
5	1033559.95	492374.26	126.1	125.1	121.1	115.1	112.1	111.1	79.1	78.1	77.1
6	1005919.39	496337.07	94.71	93.71	82.71	80.71	77.71	76.71	60.84	59.84	58.84

Fuente: Propia.

Luego, para calcular la altitud topográfica de la base de cada litología se restó la altitud de cada perfil menos el espesor acumulado de cada litología; siendo los espesores acumulados de cada capa del modelo los mostrados en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Espesores acumulados de cada litología

Datos de los espesores acumulados de cada litología									
Perfiles	Espesor 1 (m)	Espesor 2 (m)	Espesor 3 (m)	Espesor 4 (m)	Espesor 5 (m)	Espesor 6 (m)	Espesor 7 (m)	Espesor 8 (m)	Espesor 9 (m)
1	1	2	3	4	9	14	44	54	57.2
2	1	2	10	14	17	23	33.6	34.6	35.6
3	1	2	35	36	40.3	44.6	61.9	75.1	76.1
4	1	23	25	26	66	69	70	71	72
5	1	2	6	12	15	16	48	49	50
6	1	2	13	15	18	19	34.87	35.87	36.87

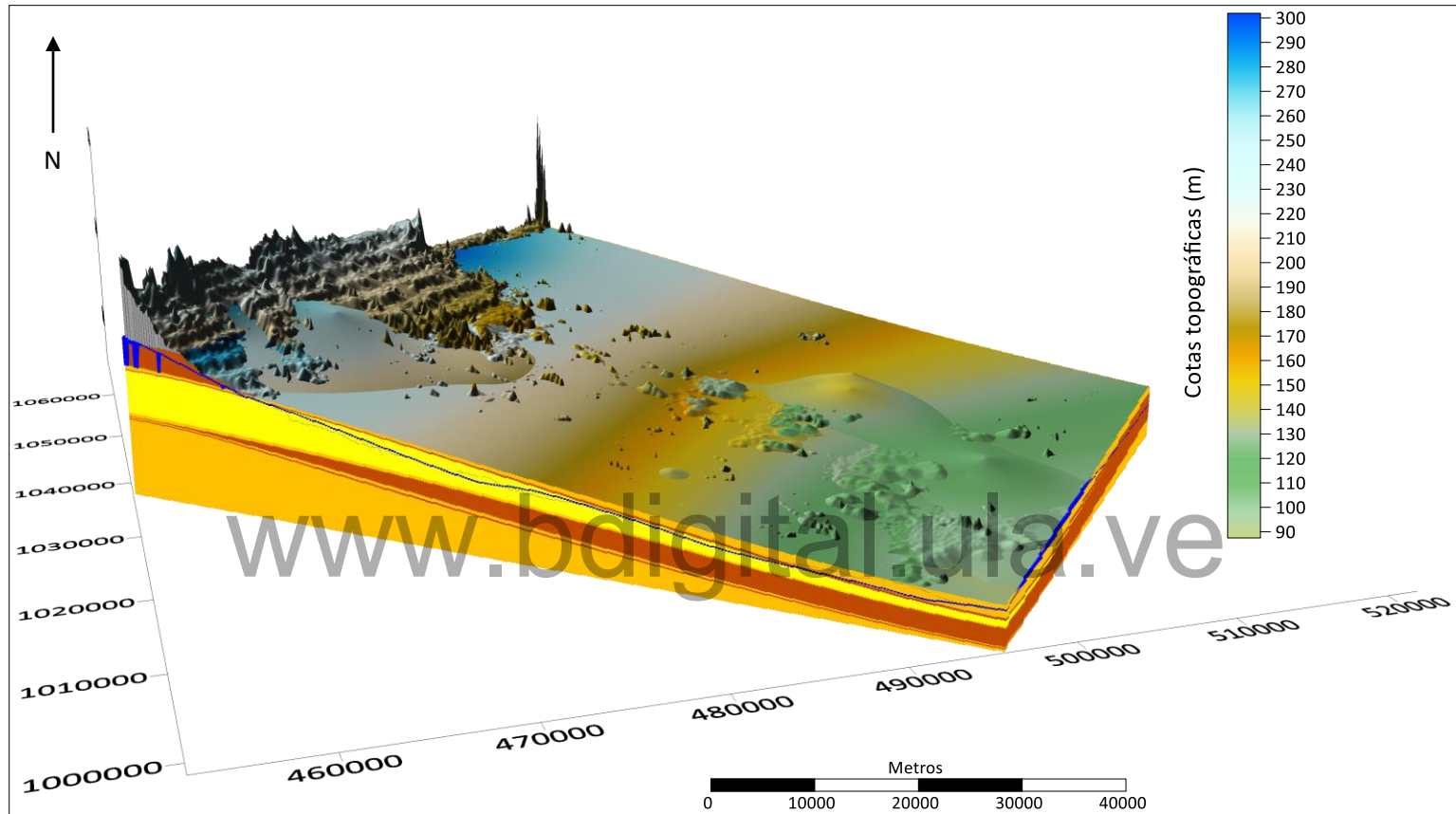
Fuente: Propia.

A partir de la base de datos creada y con la utilización del programa Surfer 15.0, se realizaron los mapas de contorno de cada una de las bases de las capas que conformaban la secuencia litológica, para la construcción y visualización del modelo hidrogeológico en tres

dimensiones. Primero se creó el modelo digital en 3D del terreno y luego se crearon los modelos digitales en 3D para cada una de las nueve capas del modelo. Una vez generadas todas las capas del modelo, se siguió con el proceso de blanqueamiento que limita cada capa del modelo a la zona de estudio. Luego de obtener las capas definitivas del modelo se procedió a solaparlas, obteniendo el modelo hidrogeológico de la Figura 5.5.

En relación a aspectos litológicos de la zona donde se encuentra el acuífero representado en el modelo, Cabrera (1980) señala que el piedemonte es producto de depósitos de material aluvial, que son una secuencia de estratos permeables e impermeables, compuestos de gravas, arenas, limos y arcillas en todas sus combinaciones. Los materiales gruesos se fueron depositando según la velocidad del agua de los ríos, de tal manera que al ir bajando y disminuyendo la pendiente del río disminuyen las capas de material grueso y superficialmente se observa un depósito de materiales más finos, como arenas finas, limos y arcillas, debido al displayamiento de los ríos.

www.bdigital.ula.ve



Fuente: Propia.

Figura 5.5. Modelo hidrogeológico conceptual obtenido.

Reconocimiento

5.3. Estimación de las reservas de agua subterránea en el acuífero

Una vez elaborado el modelo hidrogeológico conceptual se calculó el volumen total permeable saturado de las capas definidas como permeables y se aplicó la Ec. 5.2:

$$\text{Volumen de reservas} = \text{Volumen total permeable saturado} \times \text{porosidad eficaz} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Es importante señalar que, mediante el programa Surfer 15.0 fue posible calcular el volumen total permeable saturado de las capas definidas como permeables en el modelo hidrogeológico, las cuales se encuentran por debajo del nivel piezométrico. Para ello se introdujo tanto la base de la capa que está por encima de la capa permeable en cuestión como la base de la capa catalogada como permeable. También se seleccionó el polígono límite para el cálculo del volumen que en este caso corresponde al área de estudio.

Una vez hecho esto el programa muestra un reporte del cálculo de volumen realizado para cada capa permeable. En dicho reporte se observan distintos volúmenes que son calculados por determinados métodos matemáticos; para efectos de este estudio se tomó en cuenta el volumen neto (*Net Volume [Cut-Fill]*) para cada capa considerada como permeable.

En el modelo obtenido, se consideraron 4 capas permeables, a las cuales les corresponde un valor de porosidad eficaz de 10% para las arenas y 15% para las gravas según la Tabla 5.7 ; y aplicando la Ec. 5.2 se obtuvo el volumen de reservas permanentes para cada capa, tal como se muestra en la Tabla 5.8.

Tabla 5.7. Porosidades totales y eficaces de diversos materiales

Material		Porosidad total % m					Porosidad eficaz % m _e		
		Med.	Normal		Extraordinaria		Med.	Máx.	Mín.
Tipo	Descripción		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.			
Rocas masivas	Granito	0.3	4	0.2	9	0.05	<0.2	0.5	0.0
	Caliza masiva	8	15	0.5	20		<0.5	1	0.0
	Dolomía	5	10	2			<0.5	1	0.0
Rocas metamórficas		0.5	5	0.2			<0.5	2	0.0
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobos	30	50	10	60	5	<5	20	0.0
	Escorias	25	80	10			20	50	1
	Pumitas	85	90	50			<5	20	0.0
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0.1			<1	2	0.1
	Basaltos vacuolares	12	30	5			5	10	1
Rocas sedimentarias consolidadas (ver rocas masivas)	Pizarras sedimentarias	5	15	2	30	0.5	<2	5	0.0
	Areniscas	15	25	3	30	0.5	10	20	0.0
	Creta blanda	20	30	10			1	5	0.2
	Caliza detrítica	10	30	1.5			3	20	0.5
Rocas sedimentarias sueltas	Aluviones	25	40	20	45	15	15	35	5
	Dunas	35	40	30			20	30	10
	Gravas	30	40	26	40	20	25	35	15
	Loess	45	55	40			<5	10	0.1
	Arenas	35	45	20			25	35	10
	Depósitos glaciares	25	35	15			15	30	5
	Limos	40	50	35			10	20	2
	Arcillas sin compactar	45	60	40	85	30	2	10	0.0
	Suelos superiores	50	60	30			10	20	1

Fuente: Tomado de Jégat (2014).

Tabla 5.8. Valor total de las reservas de agua en el acuífero

Reservas de agua en el acuífero			
Tipo de suelo	Porosidad eficaz (%)	Volumen total permeable saturado (m ³)	Reservas de Agua (m ³)
Arena	0.10	7287979637.68	728797963.77
Grava	0.15	19026231365.68	2853934704.85
Grava	0.15	50557704694.24	7583655704.14
Grava	0.15	3327585365.04	499137804.76
Total			11,665,526,177.51

Fuente: Propia.

La sumatoria de los valores de volumen de reservas que se obtuvieron para todos los materiales definidos como permeables y que se encontraban debajo del nivel piezométrico, corresponde al volumen total de reservas de agua del acuífero, obteniendo en este caso un volumen de 11.666×10^9 m³. Tal como lo señala Mejias (2005), el volumen de reservas permanentes representa el volumen de agua libre almacenado en el acuífero que pudiera ser extraído, limitado en la base por el sustrato impermeable y en el techo por la superficie piezométrica.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 6. ESTIMACIÓN DE LAS DEMANDAS DE RIEGO

En el presente capítulo se analiza el efecto del cambio climático sobre los requerimientos de agua de tres cultivos seleccionados (arroz, maíz y sorgo) que son representativos del área de estudio, asignándoles un porcentaje de siembra determinado a partir del promedio del área sembrada para el período 2008-2012; mientras que el porcentaje restante correspondiente a otros rubros se le asignó a un cultivo de referencia, en este caso pasto. Para realizar dicho análisis se utilizó el programa computacional de la FAO conocido como CROPWAT en su versión 8.0, considerando dos escenarios (i) la estimación básica de las necesidades de agua de los cultivos con datos climáticos históricos y para el año actual (ii) la estimación de las necesidades de agua de riego para años futuros, teniendo en cuenta condiciones de cambio climático. Todo esto para posteriormente contrastar los requerimientos hídricos de esos cultivos con la disponibilidad de agua subterránea en el área de estudio.

Es de notar que, los modelos de simulación agroclimáticos, como el CROPWAT, son un elemento importante en la toma de decisiones en la agricultura ya que permiten cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos; y con base a esos requerimientos de agua preparar estrategias de adaptación para minimizar los posibles impactos negativos que pueda tener el cambio climático en una zona determinada. El CROPWAT presenta cinco módulos para entrada de datos y tres módulos de cálculo (módulos de resultados).

6.1. Estimación básica de las necesidades de agua de los cultivos

La estimación de las necesidades de agua de los cultivos seleccionados se realizó con los datos climáticos históricos del área de estudio. El período de años utilizado para establecer el patrón de siembra histórico fue 2008-2012. Las fechas de siembra utilizadas para los cultivos fueron: 15 de mayo para el arroz, 20 de junio para el maíz, 01 de abril para el sorgo y 01 de enero para el pasto, teniendo una fecha de cosecha diferente según el rubro. Para el arroz y el maíz se consideró un ciclo vegetativo con una duración de 125 días, para el sorgo de 130 días y para el pasto de 365 días.

Es importante señalar que el CROPWAT por defecto utiliza el método de la FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), cuyos valores son utilizados para estimar los requerimientos de agua de los cultivos durante las distintas etapas de desarrollo. No obstante, en este trabajo para el cálculo de la evapotranspiración de referencia se utilizó la Ec. 6.1, citada en Vega y Jara (2009) y originalmente propuesta por Holdridge en 1959. La ecuación de Holdridge depende linealmente de la temperatura media del aire multiplicada por un coeficiente único (C_{HO}). Siendo la constante C_{HO} de la Ec. 6.1 igual a 58.93 para estimaciones anuales e igual a 0.161 para estimaciones diarias.

$$ET_o = C_{HO} \times T \quad \text{Ec. 6.1}$$

Donde

ET_o es la evapotranspiración de referencia; mm tiempo^{-1}

C_{HO} es un coeficiente único; igual a 58.93 para estimaciones anuales y 0.161 para estimaciones diarias de evapotranspiración

T es la temperatura media del aire; en $^{\circ}\text{C}$

Por otro lado, se realizó un análisis de sensibilidad asumiendo un total de área regada correspondiente al 25, 50 y 75 % del área total de estudio que en este caso es de aproximadamente 242700 ha (2427 km^2) y se utilizó el porcentaje de siembra histórico de los cultivos considerados, como se muestra en la Tabla 6.1. Asimismo, se asumió una eficiencia de 55 % para el arroz y 70% para los demás cultivos.

Luego de aplicar el procedimiento correspondiente en el programa CROPWAT se obtuvo el déficit de precipitación y los requerimientos de riego de cada cultivo para la condición histórica y la actual.

Tabla 6.1. Porcentajes de área sembrada según el patrón de siembra histórico

Porcentajes de área sembrada según el patrón histórico				
Patrón de siembra histórico promedio		Área regada (ha)		
		60675 ha (25% del área total)	121350 ha (50% del área total)	182025 ha (75% del área total)
Cultivo	% de siembra	Área cultivada (ha)	Área cultivada (ha)	Área cultivada (ha)
Arroz	21	12868	25736	38604
Maíz	39	23543	47085	70628
Sorgo	6	3604	7207	10811
Otros rubros	34	20661	41321	61982

Fuente: Propia.

6.1.1. Demanda de riego para la condición histórica

Se determinó el requerimiento de agua de los cultivos seleccionados, en el año 2009, para estimar las demandas para la condición histórica. En la Tabla 6.2 se observa el requerimiento de riego asumiendo respectivamente el 25, 50 y 75 % del área de estudio bajo riego, para el año 2009. Dichos requerimientos se presentan en l/s/ha y en m³/s, afectados por la eficiencia de riego considerada para cada cultivo y calculados para las hectáreas asumidas bajo riego de cada rubro como se presentó en la Tabla 6.1. Asimismo, en la Figura 6.1 y la Figura 6.2 se observan los gráficos correspondientes a estos resultados.

6.1.2. Demanda de riego para la condición actual

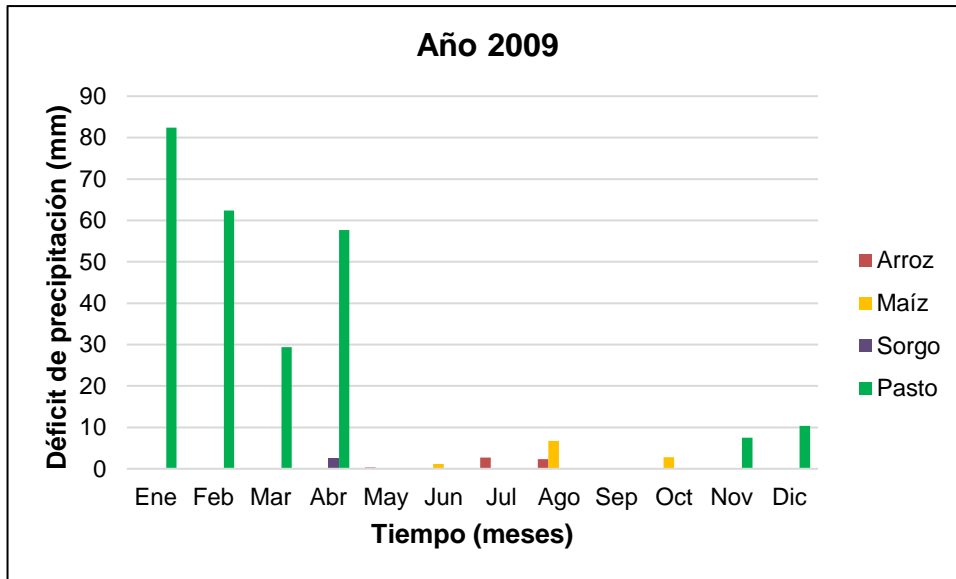
Para estimar las demandas de riego para la condición actual, se determinó el requerimiento de agua de los cultivos seleccionados para el año 2022. En la Tabla 6.3 se observa el requerimiento de riego para dicho año asumiendo el 25, 50 y 75 % del área de estudio, respectivamente. Al igual que en el caso anterior dichos requerimientos se presentan en l/s/ha y en m³/s, afectados por la eficiencia de riego mencionada para cada cultivo y calculados para las hectáreas asumidas bajo riego de cada rubro como se presentó en la Tabla 6.1. Del mismo modo, en la Figura 6.3 y la Figura 6.4 se observan los gráficos correspondientes a estos resultados.

Tabla 6.2. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2009

Requerimientos de riego para el año 2009													
Cultivos/meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Déficit de Precipitación (mm/mes)													
1. Arroz	0	0	0	0	0.3	0	2.7	2.3	0	0	0	0	0.44
2. Maíz	0	0	0	0	0	1.2	0	6.7	0	2.8	0	0	0.89
3. Sorgo	0	0	0	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.21
4. Pasto	82.4	62.4	29.4	57.7	0	0	0	0	0	0	7.5	10.4	20.82
Req. Netos sistema													
Área regada: 25% del área total													
en l/s/h real	3087.3	2588.5	1097.8	2236.9	5.5	60.7	49.5	365.4	0.0	117.5	290.4	389.7	857.44
en m ³ /s real	3.1	2.6	1.1	2.2	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.1	0.3	0.4	0.86
Área regada: 50% del área total													
en l/s/h real	6174.6	5176.9	2195.6	4473.8	11.0	121.5	99.1	730.8	0.0	235.1	580.7	779.3	1714.86
en m ³ /s real	6.2	5.2	2.2	4.5	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.2	0.6	0.8	1.71
Área regada: 75% del área total													
en l/s/h real	9261.9	7765.3	3293.4	6710.7	16.5	182.2	148.6	1096.2	0.0	352.6	871.1	1169.0	2572.28
en m ³ /s real	9.3	7.8	3.3	6.7	0.0	0.2	0.1	1.1	0.0	0.4	0.9	1.2	2.57

Fuente: Propia.

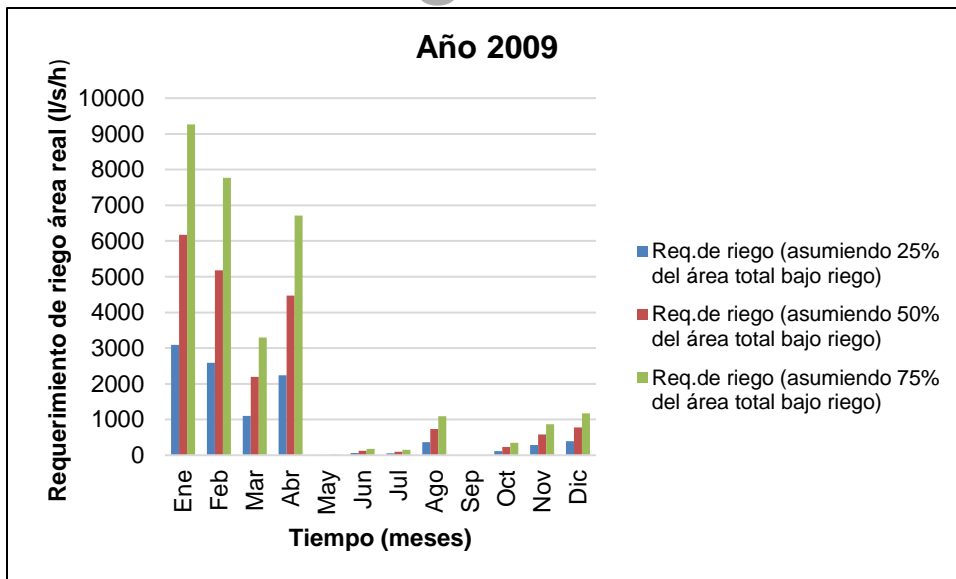
Reconocimiento



Fuente: Propia.

Figura 6.1. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2009.

www.bdigital.ula.ve



Fuente: Propia.

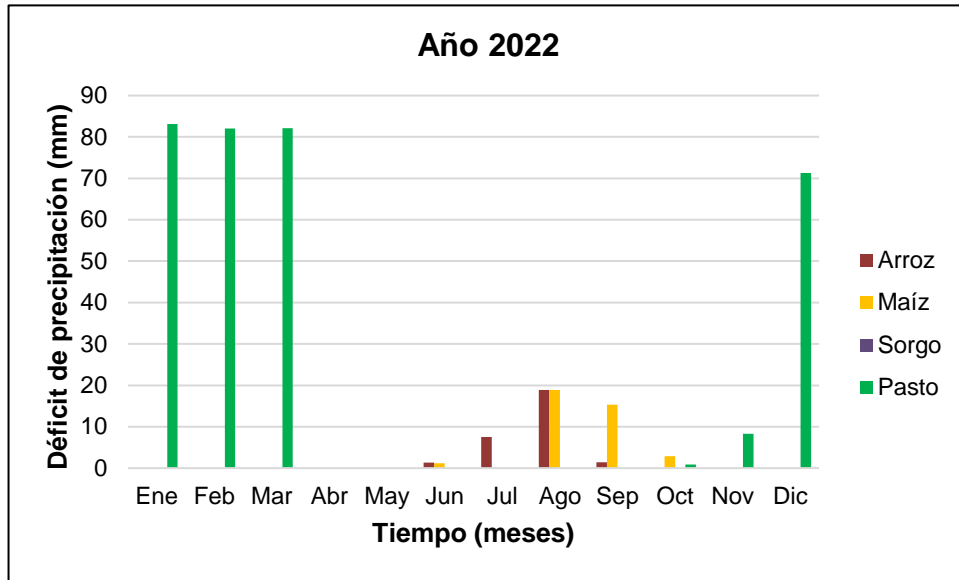
Figura 6.2. Requerimiento de riego del sistema para el año 2009.

Tabla 6.3. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2022

Requerimientos de riego para el año 2022													
Cultivos/meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Déficit de Precipitación (mm/mes)													
1. Arroz	0	0	0	0	0	1.3	7.5	18.9	1.4	0	0	0	2.43
2. Maíz	0	0	0	0	0	1.2	0	18.9	15.3	2.9	0	0	3.19
3. Sorgo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
4. Pasto	83.1	82	82.1	0	0	0	0	0	0	0.9	8.3	71.3	27.31
Req. Netos sistema													
Área regada: 25% del área total													
en l/s/h real	3113.6	3397.4	3076.1	0.0	0.0	85.4	137.6	1277.2	790.7	156.2	321.3	2667.7	1251.92
en m ³ /s real	3.1	3.4	3.1	0.0	0.0	0.1	0.1	1.3	0.8	0.2	0.3	2.7	1.25
Área regada: 50% del área total													
en l/s/h real	6227.0	6794.7	6152.1	0.0	0.0	170.7	275.2	2554.3	1581.3	312.3	642.7	5335.3	2503.80
en m ³ /s real	6.2	6.8	6.2	0.0	0.0	0.2	0.3	2.6	1.6	0.3	0.6	5.3	2.50
Área regada: 75% del área total													
en l/s/h real	9340.6	10192.0	9228.2	0.0	0.0	256.1	412.7	3831.5	2372.0	468.5	964.0	8003.0	3755.71
en m ³ /s real	9.3	10.2	9.2	0.0	0.0	0.3	0.4	3.8	2.4	0.5	1.0	8.0	3.76

Fuente: Propia.

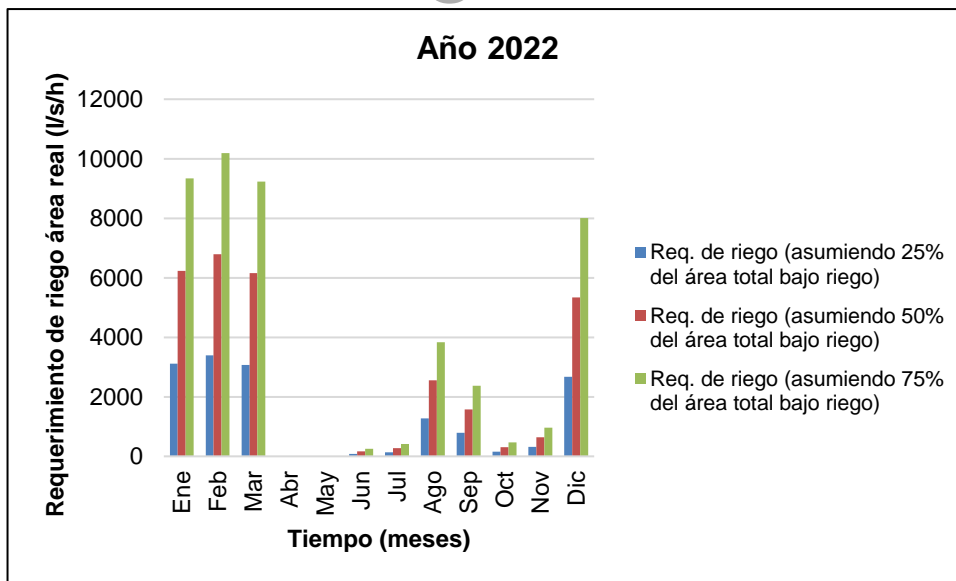
Reconocimiento



Fuente: Propia.

Figura 6.3. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2022.

www.bdigital.ula.ve



Fuente: Propia.

Figura 6.4. Requerimiento de riego del sistema para el año 2022.

6.2. Estimación de las necesidades de agua de los cultivos, considerando condiciones de cambio climático

Para estimar y analizar la influencia del cambio climático sobre las demandas de riego se realizó una comparación entre los datos obtenidos para el período histórico y el actual con respecto a los datos de los años 2060 y 2080 bajo un escenario intermedio (RCP 4.5) y un escenario más desfavorable (RCP 8.5); lo cual se realizó usando el mismo patrón de cultivo y variando sólo los registros climáticos (precipitación y ETo). Las fechas de siembra utilizadas para los distintos cultivos fueron las mismas usadas para los años 2009 y 2022.

6.2.1. Requerimientos de riego para los años 2060 y 2080 bajo un escenario intermedio (RCP 4.5)

Se estimó la demanda de riego para los años futuros 2060 y 2080 con un escenario intermedio (RCP 4.5), y los mismos porcentajes de área regada pero esta vez utilizando los datos de precipitación y temperatura media obtenidos del *Climate Explorer* para el modelo seleccionado en este estudio el cual fue el CNRM-CM5 para un escenario con RCP 4.5 y años 2060 y 2080. Los resultados obtenidos en este caso se muestran en la Tabla 6.4 y la Tabla 6.5 y en la Figura 6.5 hasta la Figura 6.8.

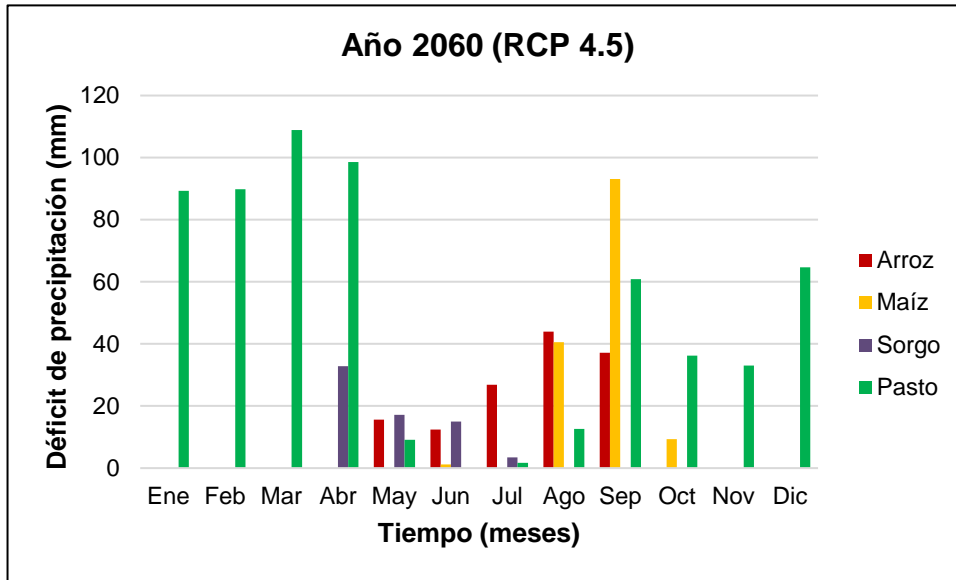
6.2.2. Requerimientos de riego para los años 2060 y 2080 bajo un escenario más desfavorable (RCP 8.5)

Al igual que en el caso anterior, se estimó el requerimiento de riego para los años 2060 y 2080 pero esta vez considerando un escenario más desfavorable (RCP 8.5), manteniendo tanto los porcentajes de áreas regadas como la eficiencia de cada cultivo y tomando en cuenta la precipitación y temperatura media para los años 2060 y 2080 obtenidas con la página del *Climate Explorer* para el modelo CNRM-CM5. Los resultados obtenidos para los requerimientos de riego en los años 2060 y 2080 con RCP 8.5 se muestran en la Tabla 6.6 y la Tabla 6.7 y en la Figura 6.9 hasta la Figura 6.12.

Tabla 6.4. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2060 (RCP 4.5)

Requerimientos de riego para el año 2060 (RCP 4.5)													
Cultivos/meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Déficit de Precipitación (mm/mes)													
1. Arroz	0	0	0	0	15.6	12.4	26.9	44	37.2	0	0	0	11.34
2. Maíz	0	0	0	0	0	1.2	0	40.6	93.1	9.3	0	0	12.02
3. Sorgo	0	0	0	32.8	17.2	15	3.5	0	0	0	0	0	5.71
4. Pasto	89.3	89.8	108.9	98.6	9.1	0	1.7	12.6	60.9	36.2	33	64.7	50.40
Req. Netos sistema													
Área regada: 25% del área total													
en l/s/h real	3342.1	3725.1	4084.0	3856.5	647.0	313.6	688.5	4578.1	6630.6	1478.8	1277.6	2424.2	2753.85
en m ³ /s real	3.3	3.7	4.1	3.9	0.6	0.3	0.7	4.6	6.6	1.5	1.3	2.4	2.75
Área regada: 50% del área total													
en l/s/h real	6684.1	7450.1	8167.8	7713.0	1293.9	627.3	1377.0	9156.2	13261.1	2957.5	2555.3	4848.2	5507.62
en m ³ /s real	6.7	7.5	8.2	7.7	1.3	0.6	1.4	9.2	13.3	3.0	2.6	4.8	5.51
Área regada: 75% del área total													
en l/s/h real	10026.2	11175.1	12251.7	11569.5	1940.9	940.9	2065.5	13734.3	19891.6	4436.2	3832.9	7272.4	8261.43
en m ³ /s real	10.0	11.2	12.3	11.6	1.9	0.9	2.1	13.7	19.9	4.4	3.8	7.3	8.26

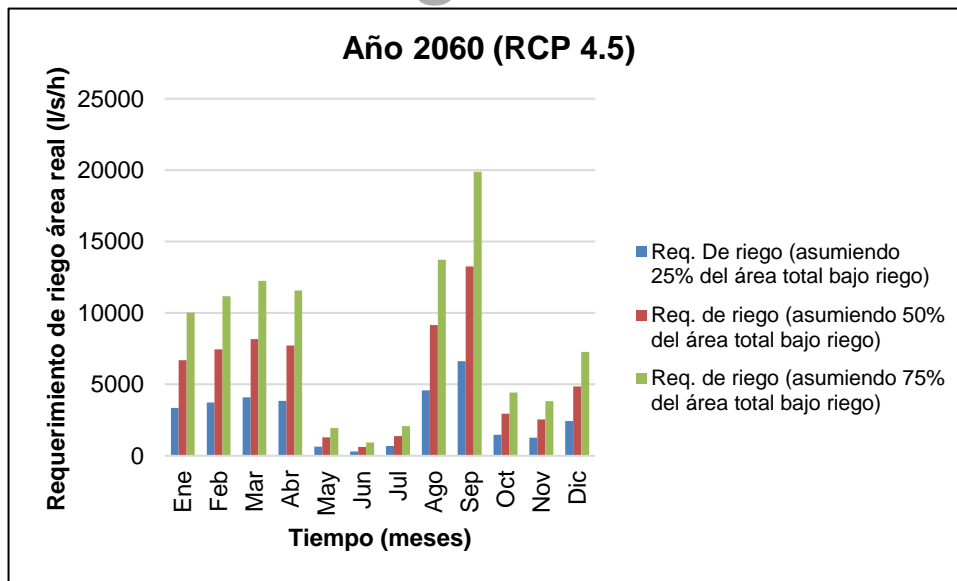
Fuente: Propia.



Fuente: Propia.

Figura 6.5. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2060 (RCP 4.5).

www.bdigital.ula.ve



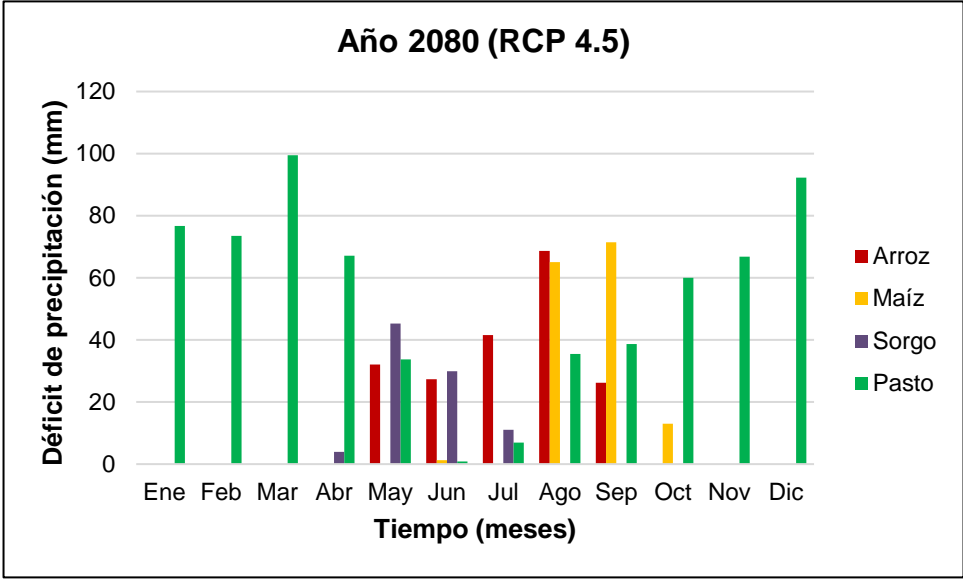
Fuente: Propia.

Figura 6.6. Requerimiento de riego del sistema para el año 2060 (RCP 4.5).

Tabla 6.5. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2080 (RCP 4.5)

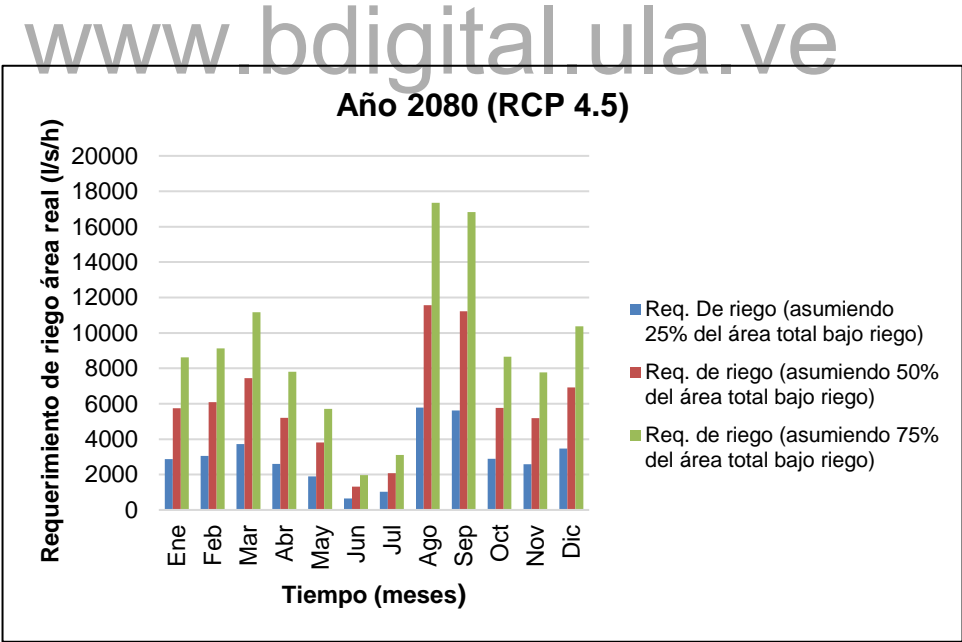
Requerimientos de riego para el año 2080 (RCP 4.5)													
Cultivos/meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Déficit de Precipitación (mm/mes)													
1. Arroz	0	0	0	0	32.1	27.3	41.6	68.7	26.2	0	0	0	16.33
2. Maíz	0	0	0	0	0	1.3	0	65.1	71.5	13	0	0	12.58
3. Sorgo	0	0	0	3.9	45.3	29.9	11.1	0	0	0	0	0	7.52
4. Pasto	76.7	73.5	99.5	67.1	33.7	0.9	6.9	35.5	38.7	60	66.8	92.3	54.30
Req. Netos sistema													
Área regada: 25% del área total													
en l/s/h real	2873.8	3044.8	3724.3	2602.5	1902.0	653.7	1034.4	5781.4	5609.3	2884.7	2590.1	3458.3	3013.29
en m ³ /s real	2.9	3.0	3.7	2.6	1.9	0.7	1.0	5.8	5.6	2.9	2.6	3.5	3.01
Área regada: 50% del área total													
en l/s/h real	5747.5	6089.5	7448.5	5205.0	3804.0	1307.5	2068.9	11562.7	11218.5	5769.3	5180.2	6916.4	6026.50
en m ³ /s real	5.7	6.1	7.4	5.2	3.8	1.3	2.1	11.6	11.2	5.8	5.2	6.9	6.03
Área regada: 75% del área total													
en l/s/h real	8621.2	9134.2	11172.7	7807.5	5706.0	1961.2	3103.3	17344.1	16827.8	8654.0	7770.3	10374.6	9039.74
en m ³ /s real	8.6	9.1	11.2	7.8	5.7	2.0	3.1	17.3	16.8	8.7	7.8	10.4	9.04

Fuente: Propia.



Fuente: Propia.

Figura 6.7. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2080 (RCP 4.5)



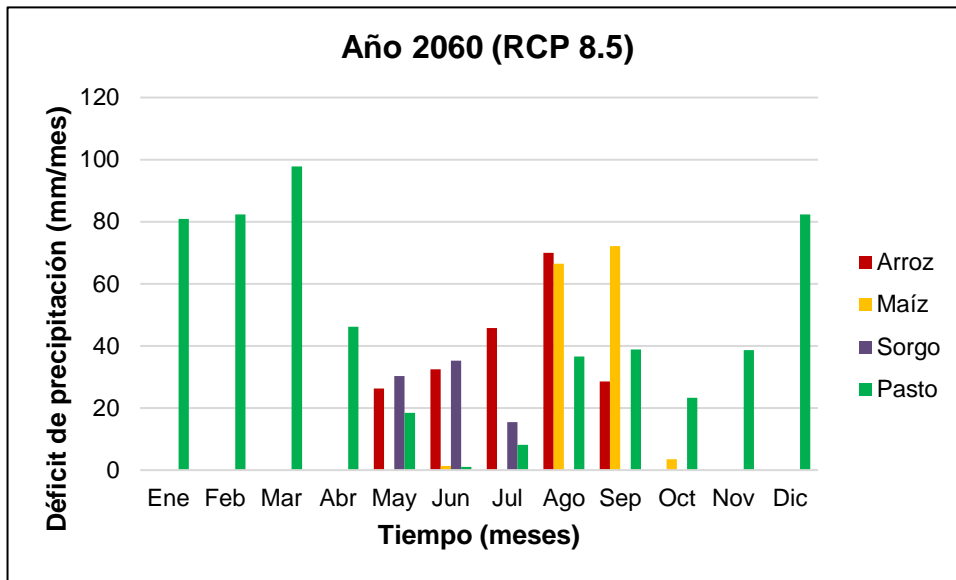
Fuente: Propia.

Figura 6.8. Requerimiento de riego del sistema para el año 2080 (RCP 4.5).

Tabla 6.6. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2060 (RCP 8.5)

Requerimientos de riego para el año 2060 (RCP 8.5)													
Cultivos/meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Déficit de Precipitación (mm/mes)													
1. Arroz	0	0	0	0	26.3	32.5	45.8	70	28.5	0	0	0	16.93
2. Maíz	0	0	0	0	0	1.3	0	66.5	72.1	3.5	0	0	11.95
3. Sorgo	0	0	0	0	30.3	35.2	15.5	0	0	0	0	0	6.75
4. Pasto	80.9	82.4	97.8	46.2	18.5	1	8.1	36.6	38.9	23.3	38.6	82.3	46.22
Req. Netos sistema													
Área regada: 25% del área total													
en l/s/h real	3031.1	3418.1	3664.3	1788.7	1212.4	762.5	1159.7	5910.2	5703.9	1048.1	1494.5	3083.6	2689.76
en m³/s real	3.0	3.4	3.7	1.8	1.2	0.8	1.2	5.9	5.7	1.0	1.5	3.1	2.69
Área regada: 50% del área total													
en l/s/h real	6062.2	6836.1	7328.6	3577.4	2424.7	1525.0	2319.3	11820.2	11407.6	2096.3	2988.9	6167.1	5379.44
en m³/s real	6.1	6.8	7.3	3.6	2.4	1.5	2.3	11.8	11.4	2.1	3.0	6.2	5.38
Área regada: 75% del área total													
en l/s/h real	9093.3	10254.2	10992.9	5366.0	3637.1	2287.5	3479.0	17730.2	17111.3	3144.4	4483.3	9250.6	8069.16
en m³/s real	9.1	10.3	11.0	5.4	3.6	2.3	3.5	17.7	17.1	3.1	4.5	9.3	8.07

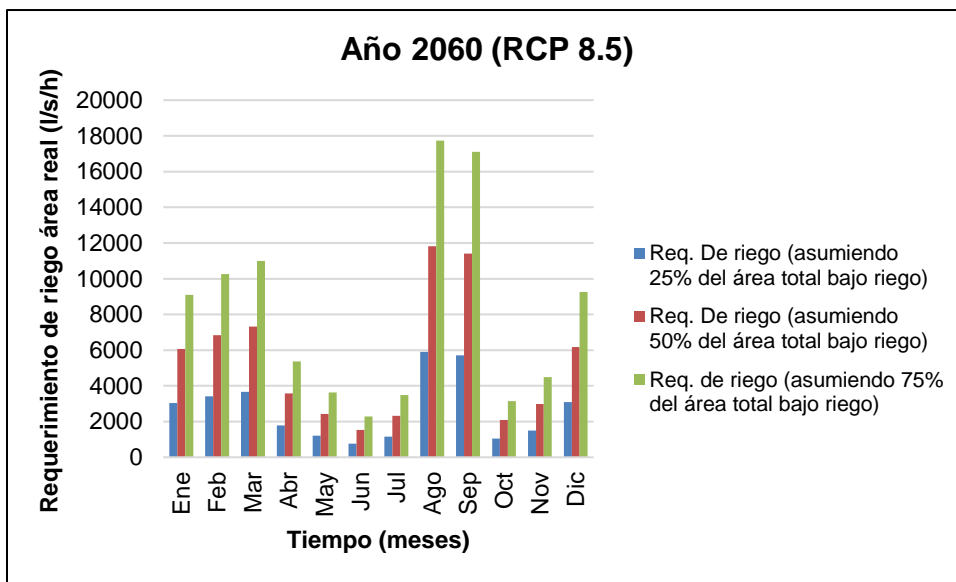
Fuente: Propia.



Fuente: Propia.

Figura 6.9. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2060 (RCP 8.5).

www.bdigital.ula.ve



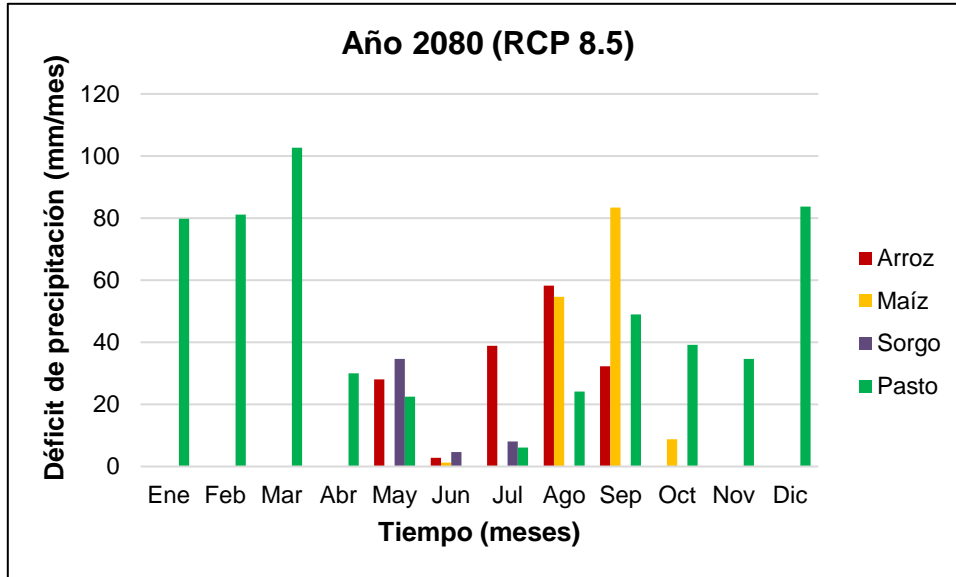
Fuente: Propia.

Figura 6.10. Requerimiento de riego del sistema para el año 2060 (RCP 8.5).

Tabla 6.7. Requerimientos de riego en el área de estudio para el año 2080 (RCP 8.5)

Requerimientos de riego para el año 2080 (RCP 8.5)													
Cultivos/meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Déficit de Precipitación (mm/mes)													
1. Arroz	0	0	0	0	28.1	2.8	38.9	58.3	32.3	0	0	0	13.37
2. Maíz	0	0	0	0	0	1.3	0	54.7	83.4	8.8	0	0	12.35
3. Sorgo	0	0	0	0	34.7	4.7	8.1	0	0	0	0	0	3.96
4. Pasto	79.8	81.1	102.7	30	22.5	0	6.1	24.1	49	39.2	34.7	83.7	46.08
Req. Netos sistema													
Área regada: 25% del área total													
en l/s/h real	2989.9	3364.2	3847.9	1157.6	1402.4	124.5	951.5	4651.2	6720.9	1903.4	1339.6	3136.0	2632.43
en m ³ /s real	3.0	3.4	3.8	1.2	1.4	0.1	1.0	4.7	6.7	1.9	1.3	3.1	2.63
Área regada: 50% del área total													
en l/s/h real	5979.8	6728.3	7695.7	2315.2	2804.7	248.9	1902.9	9302.3	13441.6	3806.8	2679.1	6272.0	5264.79
en m ³ /s real	6.0	6.7	7.7	2.3	2.8	0.2	1.9	9.3	13.4	3.8	2.7	6.3	5.26
Área regada: 75% del área total													
en l/s/h real	8969.6	10092.4	11543.6	3472.8	4207.1	373.4	2854.4	13953.5	20162.4	5710.2	4018.7	9408.0	7897.19
en m ³ /s real	9.0	10.1	11.5	3.5	4.2	0.4	2.9	14.0	20.2	5.7	4.0	9.4	7.90

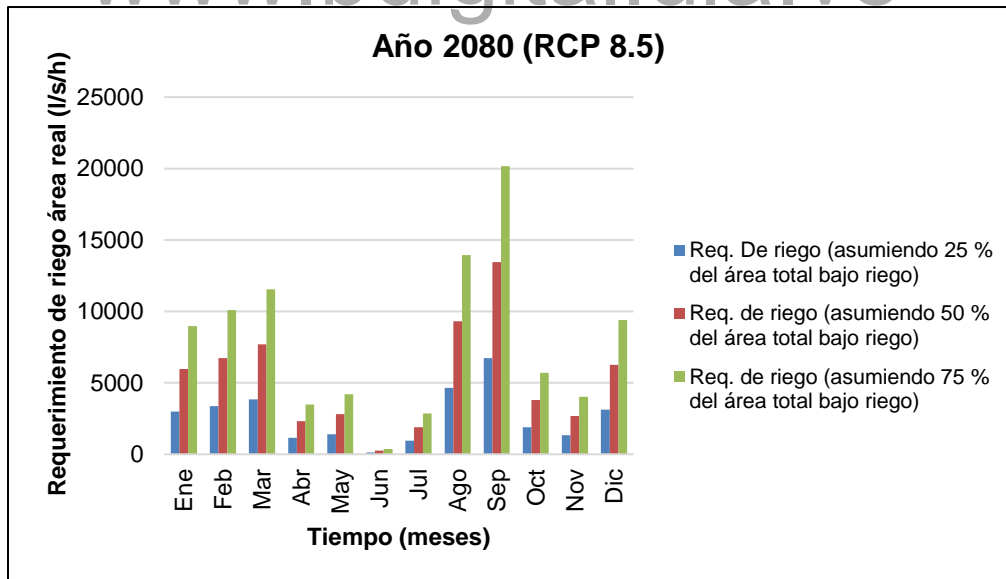
Fuente: Propia.



Fuente: Propia.

Figura 6.11. Déficit de precipitación por cultivo para el año 2080 (RCP 8.5).

www.bdigital.ula.ve



Fuente: Propia.

Figura 6.12. Requerimiento de riego del sistema para el año 2080 (RCP 8.5).

CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestra de forma organizada la interpretación de los resultados obtenidos luego de llevar a cabo las tres etapas de la metodología planteada en el capítulo de Materiales y Métodos, a fin de establecer las ideas definitivas en cuanto al logro de los objetivos propuestos. A continuación se presenta el análisis de los resultados:

7.1. Análisis de la estimación de la recarga natural del acuífero

En relación a la estimación de la recarga natural del acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa, a partir de datos observados de precipitación y evaporación utilizando un modelo hidrológico paramétrico a escala mensual, y a la variación de la recarga natural considerando condiciones de cambio climático; se muestra la Tabla 7.1 a modo de resumen con los períodos simulados y las láminas (en mm) de precipitación y del flujo subterráneo efluente (recarga) obtenidas para cada simulación.

Tabla 7.1. Períodos simulados para la estimación de la recarga natural

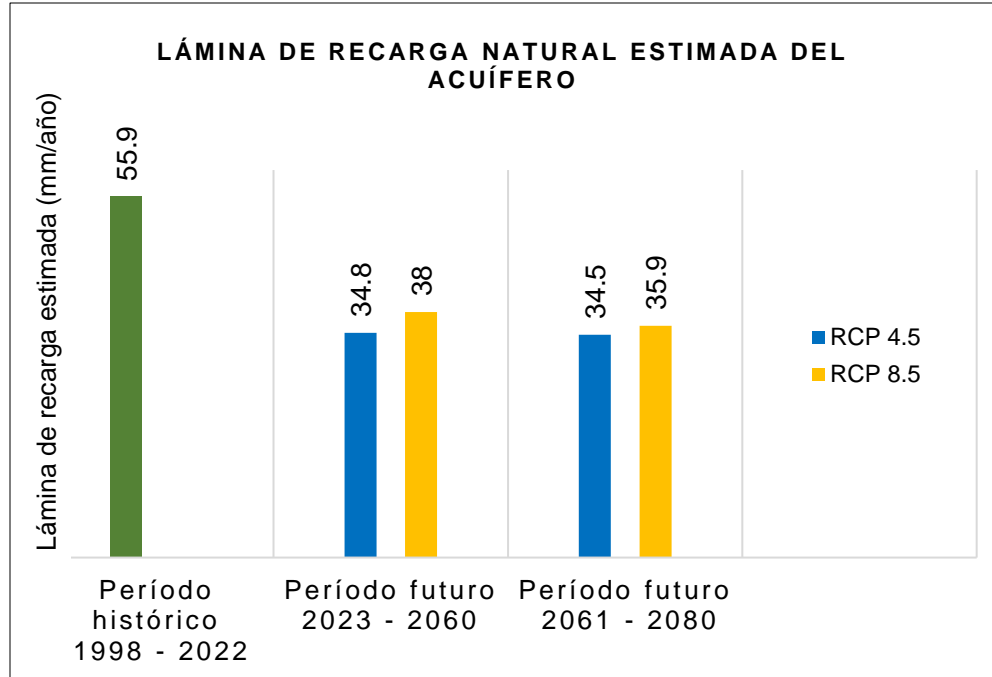
Resumen de los períodos simulados para la estimación de la recarga natural								
Modelación	Período simulado				Modelo climático	RCP	Lámina de precipitación (mm)	Lámina de recarga (mm)
	Descripción	Año Inicio	Año Fin	Total años simulados				
1	Datos medidos	1975	1997	23	---	---	24439.08	480.72
2	Datos históricos	1998	2022	25	CNRM-CM5	4.5	52109.43	1396.53
3	Datos futuros	2023	2060	38	CNRM-CM5	4.5	42251.11	1323.65
4	Datos futuros	2023	2060	38	CNRM-CM5	8.5	42840.18	1442.90
5	Datos futuros	2061	2080	20	CNRM-CM5	4.5	21741.46	689.56
6	Datos futuros	2061	2080	20	CNRM-CM5	8.5	22325.53	717.05

Fuente: Propia.

En la Tabla 7.1 se observa que la lámina de recarga obtenida para el período 1975-1997 con los datos medidos es menor que la obtenida para el período 1998-2022, esto puede atribuirse a que para el período 1975-1997 se tenía una lámina de precipitación

comparativamente menor y valores de evaporación relativamente mayor. Por otro lado, se realizó un análisis comparativo entre las simulaciones obtenidas para los períodos futuros (2023-2060 y 2061-2080) y la obtenida para el período histórico (1998-2022), ya que es el que representa de alguna manera las condiciones actuales del área de estudio. En ese sentido, las simulaciones realizadas proyectan una disminución de la recarga en los períodos futuros con respecto a la recarga en el período 1998-2022. En el período 2023-2060 para un RCP de 4.5 se proyecta que la lámina de recarga sea de 1323.65 mm, es decir, aproximadamente 34.8 mm anuales y para un mismo escenario (RCP 4.5) en el período 2061-2080 se proyecta una lámina de 689.56 mm, es decir, 34.5 mm anuales aproximadamente; mientras que en el período 1998-2022 la lámina estimada para la recarga fue de 1396.53 mm, es decir, 55.9 mm anuales aproximadamente (ver la Figura 7.1). Por lo cual, se tiene una disminución de 37.6 % (21.1 mm) en el período 2023-2060 y de 38.3 % (21.4 mm) en el período 2061-2080 (ambos períodos con RCP 4.5) con respecto al período histórico.

En cuanto al período 2023-2060 con RCP 8.5 se estimó una lámina de recarga de 1442.9 mm, es decir, 38 mm anuales aproximadamente, mientras que para el período 2061-2080 con RCP 8.5 se estimó una lámina de 717.05 mm, es decir, 35.9 mm anuales aproximadamente. Observándose que a pesar de que la recarga disminuye para ambos períodos con respecto al período 1998-2022 en un 32% (17.9 mm) y 35.8 % (20 mm) respectivamente; es mayor con respecto a la recarga estimada para los mismos períodos (2023-2060 y 2061-2080) pero con un RCP de 4.5, tal como se muestra en la Figura 7.1. Sin embargo, al ver el resumen de la Tabla 7.1 se puede notar que para los escenarios con RCP 8.5 hubo un aumento de la lámina de precipitación en esos períodos por lo cual es de esperar que aumente también la recarga.



Fuente: Romero *et al.* (2022).

Figura 7.1. Lámina de recarga anual estimada para el período histórico 1998-2022 y los períodos futuros 2023-2060 y 2061-2080.

Por último, es importante señalar que para el caso de esta investigación la calibración del modelo SIHIM tiene un error porcentual de 38% (tal como se muestra en la Tabla C.2 del Apéndice C) mientras que la diferencia porcentual de recarga obtenida entre los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 es de 5.6 % para el período futuro 2023 – 2060 y de 2.5 % para el período futuro 2061 – 2080 (ver la Tabla C.3 del Apéndice C); siendo estas diferencias bastante menores con respecto al error porcentual de la calibración por lo que se puede decir que la diferencia de recarga entre los escenarios puede no ser significativa.

7.2. Análisis de las reservas de agua subterránea estimadas mediante el modelo hidrogeológico conceptual

A través del modelo hidrogeológico conceptual elaborado se pudo calcular el volumen de reservas permanentes permeables del acuífero, que representa como se mencionó en el capítulo 5, el volumen de agua libre almacenado en el acuífero que pudiera ser extraído.

Dicho volumen total de reservas permanentes permeables (VRPP) fue de $11.666 \times 10^9 \text{ m}^3$; el cual resulta un valor aceptable en relación a la magnitud del área de estudio la cual es de 2427 km^2 aproximadamente y en virtud de las cuatro capas permeables con espesores variables que fueron consideradas para la realización del modelo conceptual. Es importante señalar, que este volumen de reservas permanentes es el que va a permitir la regulación de la extracción del agua subterránea con fines de riego, según como sea la recarga del acuífero y la demanda de agua subterránea que en este caso viene dada por los requerimientos de riego de los cultivos analizados en el área de estudio.

7.3. Análisis de la estimación de las demandas de riego

Para analizar y contrastar los resultados obtenidos en el capítulo 6 referente a la estimación de las demandas de riego con los resultados generados en el capítulo 4 sobre la estimación de la recarga natural del acuífero y las reservas permanentes permeables calculadas en el capítulo 5, se presenta la Tabla 7.2.

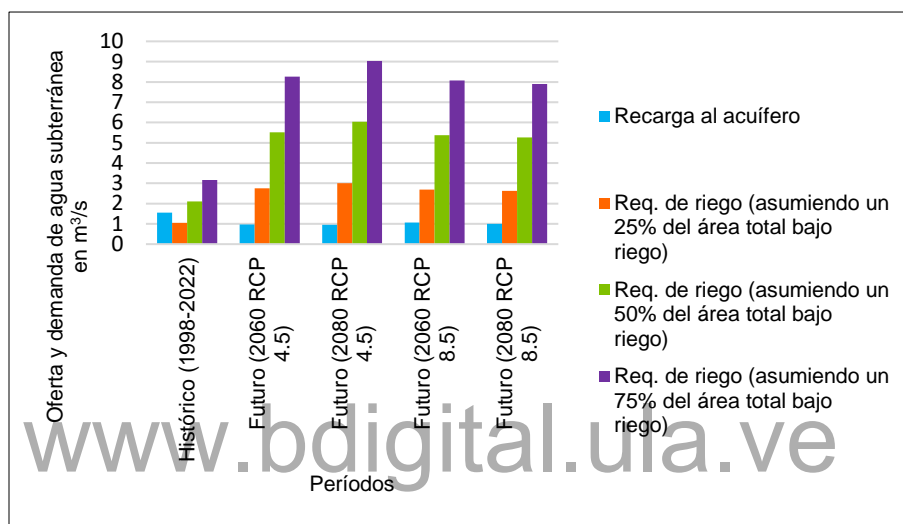
Tabla 7.2. Comparación de la recarga estimada, las reservas permanentes permeables y los requerimientos de riego en el área de estudio

Contraste entre la recarga natural estimada, los requerimientos de riego y las reservas permanentes permeables para el área de estudio							
Período	Recarga		Req. Netos del sistema				Reservas permanentes permeables
	(m ³ /s)	l/s/ha	(m ³ /s)			l/s/ha	l/ha
			Área regada: 25% del área total	Área regada: 50% del área total	Área regada: 75% del área total		
Histórico (1998-2022)	1.56	0.01771	1.05	2.11	3.16	0.06097	48.07×10^6
Futuro (2060 RCP 4.5)	0.97	0.01105	2.75	5.51	8.26	0.13745	48.07×10^6
Futuro (2080 RCP 4.5)	0.96	0.01093	3.01	6.03	9.04	0.15301	48.07×10^6
Futuro (2060 RCP 8.5)	1.06	0.01204	2.69	5.38	8.07	0.13766	48.07×10^6
Futuro (2080 RCP 8.5)	1.00	0.01137	2.63	5.26	7.90	0.13205	48.07×10^6

Fuente: Propia.

En la Tabla 7.2 se observa que el requerimiento de riego en l/s/ha es mayor que la recarga en l/s/ha estimada en todos los casos, es decir, asumiendo un 25, 50 o 75% del área total bajo riego y para todos los períodos simulados. Por lo tanto, al visualizar los resultados

obtenidos se puede decir que la demanda de agua subterránea en el área de estudio es significativamente mayor que la recarga natural del acuífero, por lo que ésta no puede satisfacer los requerimientos de riego estimados para los cultivos analizados en los períodos futuros considerando condiciones de cambio climático, como se muestra en la Figura 7.2. Es de notar que, para los requerimientos de riego en el área de estudio para el período histórico (1998 - 2022) se realizó un promedio de las demandas de riego obtenidas, con el CROPWAT, para los años 2009 y 2022.



Fuente: Propia.

Figura 7.2. Contraste de la recarga estimada y los requerimientos de riego para cada escenario planteado.

El déficit visualizado en la Figura 7.2, entre los requerimientos de riego y la recarga natural del acuífero, podría regularse mediante las reservas permanentes permeables del acuífero, considerando la magnitud del volumen de dichas reservas permanentes en l/ha, el cual fue de 48.07×10^6 l/ha, comparado con las demandas para los años analizados. Sin embargo, como lo que se busca es hacer un uso racional del recurso agua subterránea, se procedió a calcular las hectáreas que se podrían regar tomando en cuenta la recarga natural estimada, sin afectar las reservas permanentes. Para ello se dividieron las hectáreas regadas asumidas para el 25, 50 y 75% del área total entre sus respectivos requerimientos de riego en m^3/s (mostrados en la Tabla 7.2) y los valores obtenidos se multiplicaron por el valor de la

recarga estimada en m³/s para el período correspondiente, obteniendo de esta manera las hectáreas máximas reales que podrían regarse con base a la recarga natural estimada del acuífero. En la Tabla 7.3 se muestran los valores promedio obtenidos para el área máxima regable en cada período.

Tabla 7.3. Valores promedio de las superficies máximas regables con base a la recarga estimada

Superficies máximas regables con base a la recarga natural estimada del acuífero		
Período	Recarga (m ³ /s)	Área máxima regable (ha)
Histórico (1998-2022)	1.56	89908.21
Futuro (2060 RCP 4.5)	0.97	21380.14
Futuro (2080 RCP 4.5)	0.96	19333.66
Futuro (2060 RCP 8.5)	1.06	23909.11
Futuro (2080 RCP 8.5)	1.00	23060.61

Fuente: Propia.

Como se observa en la Tabla 7.3, de acuerdo a los resultados obtenidos para la recarga natural del acuífero y los requerimientos hídricos de cultivos representativos de la zona, la máxima superficie regable para la condición histórica es de 89908.21 ha, lo cual corresponde a 899.08 km² y representa aproximadamente un 37.04 % del área total de estudio, mientras que para la condición futura del año 2060 RCP 4.5 la máxima superficie regable es de 21380.14 ha, es decir, 213.80 km² que equivale a un 8.8 % del área total de estudio. Para el año 2080 RCP 4.5 la máxima superficie regable estimada es de 19333.66 ha, lo cual equivale a 193.34 km² y representa un 7.97 % del área total de estudio. En el año 2060 pero considerando un RCP de 8.5 se estima una superficie máxima regable de 23909.11 ha, lo cual equivale a 239.09 km² y representa un 9.85% del área total de estudio. Por último, para el año 2080 RCP 8.5 se estima una superficie máxima regable de 23060.61 ha, es decir, 230.61 km² que representa un 9.5 % del área total de estudio.

7.4. Uso racional del agua subterránea con fines de riego en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare

Dado que los requerimientos de agua de los cultivos analizados siguiendo el patrón de siembra histórico superan de manera significativa la recarga natural del acuífero ubicado en

el área de estudio y tomando en cuenta las estimaciones hechas con respecto a las superficies máximas regables para los distintos períodos analizados, es necesario hacer un manejo eficiente del agua subterránea para preservar las reservas permanentes del recurso en la zona estudiada. De allí que, se propongan estrategias de uso racional del agua subterránea con fines de riego, en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa. Para lo cual, se tomó como guía los lineamientos, instrumentos y principios técnicos, económicos y sociales para la gestión de las aguas subterráneas presentados por Smith *et al.* (2020), ajustándolos a los objetivos planteados en esta investigación.

Tal como lo señalan Smith *et al.* (2020), la gestión de las aguas subterráneas es una actividad interdisciplinaria que no sólo depende de conocimientos especializados sobre acuíferos y sus características técnicas, sino que también de aspectos económicos, políticas efectivas y marcos legales.

Para lograr la gestión sostenible de las aguas subterráneas se requiere que los usuarios locales, especialistas técnicos y decisores trabajen conjuntamente. Cada uno juega un papel definido, ya sea a nivel local, de cuenca, nacional o internacional, para impulsar las estrategias de cambio necesarias, así como también los actores involucrados trabajan de forma colaborativa para implementar las herramientas y acciones necesarias. El paradigma antiguo de la gestión de aguas subterráneas, el cual favorece el control por parte de las agencias técnicas, debe cambiar si las aguas subterráneas van a responder a las expectativas de sus contribuciones para el desarrollo sostenible, la conservación de biodiversidad y la resiliencia al cambio climático. Ob. cit.

Sin embargo, pese a la función crucial que tiene el agua subterránea en el mantenimiento de ecosistemas y abastecimiento de agua, el recurso sigue siendo poco comprendido y, por consiguiente, es manejado deficientemente en muchas partes del mundo. Ob. cit.

Smith *et al.* (2020) señalan algunos lineamientos sobre cómo los diferentes actores, incluyendo usuarios locales de aguas subterráneas y decisores, pueden trabajar en conjunto para establecer estrategias colaborativas que contribuyan al cambio necesario para la gestión sostenible de las aguas subterráneas. Entre estos lineamientos se encuentran:

a) Imposición de cargos y gastos para restringir la extracción del agua subterránea

La imposición de cargos o tarifas por extraer agua subterránea es el método más directo para asegurar que exista un incentivo para hacer uso eficiente del agua subterránea, debido a que los usuarios deben pagar una “tarifa por extracción del recurso (o materia prima)” dependiendo del volumen utilizado. Es común que el consumo para uso doméstico esté exento de este cargo. Smith *et al.* (2020).

Según Smith *et al.* (2020), el uso del agua subterránea para la agricultura —el mayor consumidor de recursos de agua subterránea— muy rara vez se mide y, por lo tanto, controlar el uso para riego no es tan sencillo como para la industria o el comercio. Las técnicas alternativas para calcular la extracción de agua subterránea para el riego son:

- Usar el medidor de consumo de electricidad como indicador sustituto del volumen del agua subterránea bombeada, lo cual se presta para la facturación combinada de electricidad y agua subterránea (y sanciones por falta de pago), aunque no es posible considerar la ineficiencia del bombeo.
- Usar la clasificación o capacidad de las bombas de pozos de agua (m^3/hora) y el horario estimado o monitoreo de operación (hora / mes) para estimar el uso de agua subterránea.
- Estimar el consumo de agua subterránea a partir del promedio de agua requerida para cada cultivo y las áreas correspondientes de cultivos bajo riego calculado por medio de teledetección o estudios de campo.

Es importante señalar que en este trabajo, los requerimientos de agua de cultivos representativos del área de estudio y las correspondientes áreas bajo riego fueron estimados, y sus resultados se muestran en el apartado 7.3 de esta investigación, con lo cual se estimó la demanda o consumo de agua subterránea en el área analizada.

b) Implementación y aplicación de la ley

Quizás los factores cruciales para hacer que los instrumentos económicos funcionen a favor de la sostenibilidad de los recursos de aguas subterráneas son el cumplimiento y la aplicación de la ley. Smith *et al.* (2020).

En ese sentido, con respecto al marco jurídico regulador de la cogestión del recurso agua en Venezuela, León y Portillo (2008) señalan que discusiones internacionales y nacionales durante años sobre la necesidad del agua para los seres vivos, especialmente para la raza humana, han generado normas diversas, algunas vigentes en nuestro país, las cuales pretenden garantizar a nuestros habitantes el recurso agua en cantidad y calidad suficiente para vivir con una calidad de vida adecuada.

Como punto de partida se tiene que en la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela se establece (Artículo 304) que las aguas son bienes del dominio público de la Nación y que la ley garantizará su protección, al tiempo que en el artículo 127 se consagra la obligación del Estado, con la activa participación de la sociedad, de garantizar la protección del agua, además de otros elementos de los ecosistemas. Esta norma constitucional implica, que es el Estado el administrador, en nuestro nombre, de todas las aguas que existan en el país, y que debe garantizar su protección, con la participación de los ciudadanos, como parte componente del Estado. Ob. cit.

En la Ley de Aguas, artículo 4, se hace referencia a la gestión integral de las aguas, asociada a su conservación y protección y a la prevención y control de los posibles efectos negativos de las aguas sobre la población y sus bienes. Por su parte, en el artículo 5 se menciona, entre otros aspectos, que el agua es un derecho humano y un bien social. Como parte de las medidas de protección del agua, esta ley ordena en su artículo 12 el establecimiento de rangos y límites máximos de elementos contaminantes en los efluentes líquidos generados por fuentes puntuales y el establecimiento de condiciones y medidas para controlar el uso de agroquímicos y otras fuentes de contaminación no puntuales. Además, en el artículo 18, se hace referencia a los programas y proyectos que deben ser implementados para la conservación de las cuencas hidrográficas, mientras que en los artículos 54 y 55, se mencionan y se definen las zonas protectoras de cuerpos de agua y las reservas hidráulicas, respectivamente, como figuras de régimen de administración especial o ABRAE, como comúnmente se les conoce. Ob. cit.

En la Ley Orgánica del Ambiente, artículos 55 al 57, el legislador establece que esa gestión integral del agua, definida en la Ley de Aguas, debe estar orientada a asegurar su conservación, garantizando calidad, disponibilidad y cantidad para mantener sustentable el ciclo hidrológico y, en consecuencia, el Estado debe considerar como actividades que le son

propias, hacer una clasificación de las aguas según su uso, determinar las actividades humanas capaces de degradar las aguas en sus fuentes, recorrido y represamiento, la reutilización de las aguas servidas, el tratamiento de las aguas contaminadas, la protección de las cuencas hidrográficas, y el uso adecuado de las tierras en las cuencas. Ob. cit.

La Ley de Tierras y Desarrollo Agrario establece en su articulado que el Instituto Nacional de Tierras debe llevar el censo de las aguas de uso agrario, sean destinadas para riego o para actividades de acuicultura (camaroneras, truchiculturas, etc.), regulaciones contenidas en los artículos 24 al 26 del citado texto legal. Ob. cit. Asimismo, el Ministerio del Poder Popular para la Agricultura Productiva y Tierras a través del Instituto Nacional de Tierras, tiene competencia en materia del recurso agua en las áreas rurales.

De acuerdo con León y Portillo (2008), a los instrumentos jurídicos anteriores se agregan los siguientes actos administrativos, también de obligatorio cumplimiento:

El Decreto 1400 “Normas sobre regulación y control del aprovechamiento de los recursos hídricos y cuencas hidrográficas”, el cual establece en su artículo 2 que la conservación y racional aprovechamiento de los recursos hídricos comprende todas aquellas acciones destinadas a compatibilizar la oferta de los recursos hídricos con las demandas actuales, sin comprometer la posibilidad de satisfacer las necesidades de las generaciones futuras y garantizando una mejor calidad de vida de la población.

El Decreto 883 “Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos”, en el que se define (artículo 2) la contaminación de las aguas y la calidad de un cuerpo de agua, al tiempo que se hace una clasificación (artículo 3) de las aguas.

c) Participación en la gobernanza del agua

El uso de conceptos de organización social para una gobernanza efectiva del agua, facilita la toma de decisiones informadas y la resolución de conflictos. La organización social implica establecer espacios y mecanismos que permitan la participación activa de todos los actores en el diálogo, la planificación, la toma de decisiones y la implementación de actividades en torno a un determinado tema de manera que, en la medida de lo posible, se atiendan los intereses y preocupaciones de cada parte interesada. Smith *et al.* (2020).

En tal sentido, en relación al uso racional del agua subterránea en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa, los principales actores que deben hacer parte de esa organización social para una gobernanza efectiva del recurso son:

- Ministerio del Poder Popular de Atención a las Aguas (MinAguas), cuya misión es “ejercer como autoridad nacional una gestión integral de las aguas, elemento indispensable para la vida, el bienestar humano y el desarrollo sustentable del país, basada en la administración sostenible de las regiones hidrográficas e hidrogeológicas”.
- Ministerio del Poder Popular para la Agricultura Productiva y Tierras; y sus órganos y entes adscritos entre los que se encuentran: El Banco Agrícola de Venezuela (BAV), el Instituto Nacional de Tierras (INTI) y el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas.
- Ministerio del Poder Popular de Planificación; y entes adscritos a éste como el Instituto Nacional de Estadística y la Corporación de Desarrollo de la Región de Los Llanos (CORPOLLANOS).
- La Gobernación del estado Portuguesa.
- Alcaldías de los municipios: Esteller, Santa Rosalía, Turén, Araure, Páez, Agua Blanca y Ospino.
- Los Consejos Comunales, las Mesas Técnicas de Agua y Comités de Riego, ya que estos constituyen organizaciones que facilitan la participación directa de los ciudadanos en la toma de decisiones a través de los mecanismos previstos en la norma constitucional.
- Todos aquellos usuarios que tengan concesión, asignación o licencia para realizar aprovechamiento del recurso agua, así como universidades e institutos de investigación que contribuyan en la formulación, elaboración y mejoramiento de políticas y planes relacionados a la gestión integral de las aguas.

Estos organismos e instituciones deben procurar mejorar la alineación de políticas agrícolas con los objetivos de gestión sostenible del agua subterránea para facilitar los esfuerzos de gestión local y promover la participación activa de todos los actores para un uso eficiente del recurso. Para ello, deben revisar las políticas económicas y agrícolas existentes y evaluar si hay factores económicos que influyan en el uso excesivo o mal uso del agua subterránea

para riego en la zona. Asimismo, en atención a los resultados obtenidos en este trabajo se sugiere evaluar alternativas que contribuyan a disminuir la demanda de agua de los cultivos representativos del área de estudio, para contribuir con la preservación de las reservas permanentes permeables del acuífero.

7.4.1. Estrategias para el uso racional del agua subterránea con fines de riego en el área de estudio

Considerando los planteamientos anteriores, a continuación, se presentan algunas estrategias que pueden tomarse en cuenta para el uso racional del agua subterránea con fines de riego, en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare:

- Fomentar programas de concienciación y educación, en los distintos municipios que abarca el área de estudio, que permitan a la comunidad y a los productores agrícolas de la zona desarrollar las habilidades necesarias para poder manejar adecuadamente el agua subterránea tomando en cuenta los posibles efectos del cambio climático. Lo anterior resulta necesario debido a que, tal como lo señala Parra (2018), en muchas ocasiones los productores aplican láminas de agua excesivas (hasta mayores de 200 mm) sobre todo en la etapa de preparación del suelo en el caso de cultivos como el arroz, y mecanizaciones que acarrear consecuencias severas a la estructura de los suelos. Igualmente, señala que algunos productores mantienen excesos en la aplicación de la lámina de agua durante las etapas inicial, media y final del cultivo, con la finalidad de usarla como un método de control de malezas.
- Impulsar el intercambio de información y datos referentes al uso del agua subterránea con fines de riego, entre los organismos, los productores y los usuarios de dicho recurso en la zona estudiada, con el fin de adoptar las medidas necesarias que contribuyan a la disponibilidad del agua subterránea a mediano y largo plazo. En relación a este punto, tal como lo señala Smith *et al.* (2020), los usuarios de aguas subterráneas traen a la mesa conocimiento local sobre usos, prácticas de manejo, disponibilidad y calidad del agua subterránea, el cual ayuda a que los planes y las estrategias para la gestión y protección de las aguas subterráneas sean robustos, localmente pertinentes y por ende sostenibles. A menudo, ellos tienen reglas locales

para el manejo de las aguas subterráneas que deben integrarse a los planes y las estrategias.

- Definir una programación de riego adecuada teniendo en cuenta tanto las proyecciones climáticas futuras mostradas en la Tabla 7.2 en relación a los requerimientos hídricos de cultivos representativos de la zona, en este caso arroz, maíz, sorgo y pasto, así como la estimación de las superficies máximas regables con base a la recarga natural estimada del acuífero en esos períodos de tiempo presentadas en la Tabla 7.3.
- Establecer una superficie total sembrada en el área de estudio acorde con la superficie máxima regable estimada (usando agua subterránea), cuyos resultados se muestran en la Tabla 7.3 , la cual es mucho menor que la asumida inicialmente para cada período. Asimismo, modificar los patrones de siembra considerando el requerimiento de agua de los cultivos que se deseen implantar en la zona, utilizando un modelo agroclimático como herramienta de apoyo.
- Promover el uso de modelos de simulación agroclimáticos, entre los entes gubernamentales, instituciones educativas y gremios de agricultores; que sirvan de apoyo para la toma de decisiones en torno a los requerimientos de riego de distintos cultivos. Estos modelos, como se observó en esta investigación, pueden ser utilizados para analizar las demandas de riego considerando condiciones de cambio climático.
- Establecer un marco legal e institucional local coherente, que defina las normas y directrices para una adecuada explotación del acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa; tomando en cuenta lo esbozado en el artículo 60 de la Ley de Aguas, el cual establece que “el uso de las aguas debe adecuarse a la disponibilidad del recurso, a las necesidades reales de la actividad a la que se pretende destinar, al interés público y a las previsiones de los planes de gestión integral de las aguas”; y lo establecido en la normativa vigente en el país relacionada con la gestión de las aguas.
- Combinar la alternativa de estimar la demanda de agua subterránea con base a los requerimientos hídricos de cultivos representativos del área de estudio con la estimación del uso del agua subterránea en la zona a partir del consumo de electricidad; ya que como lo indican Smith *et al.* (2020) una vez que se construye un

pozo de agua, el mayor costo en la extracción de agua subterránea es la energía requerida para bombear el agua. Este costo depende no sólo del nivel freático, las características del acuífero y la eficiencia del pozo, sino también del costo unitario de energía para el bombeo. Por lo tanto, el precio de la electricidad rural puede ser una herramienta útil para incidir en el bombeo de aguas subterráneas.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo a partir del análisis de los resultados obtenidos. Además, se plantean las sugerencias o recomendaciones que sobre el estudio se consideran necesarias.

8.1. Conclusiones

El cambio climático, el aumento de la población y la competencia por la tierra y el agua a nivel mundial son factores que contribuyen a una mayor vulnerabilidad a la inseguridad alimentaria. Por lo cual, hacer un uso racional del agua con fines de riego agrícola es fundamental para mejorar la seguridad alimentaria e influir positivamente en el desarrollo económico del país, sin ocasionar perjuicios a los recursos tierra y agua. El estado Portuguesa se caracteriza por su amplia disponibilidad de tierras agrícolas y suelos de buena calidad que le otorgan un valor estratégico desde el punto de vista económico y en términos de la seguridad alimentaria nacional. Igualmente, el estado posee un alto potencial de los recursos hídricos superficiales y subterráneos existentes. Sin embargo, este alto potencial no es garantía de un uso adecuado de las aguas.

Las estrategias propuestas para el uso racional del agua subterránea con fines de riego, en el acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa, considerando condiciones de cambio climático están basadas en el riesgo que supone el cambio climático para la disponibilidad de agua subterránea a largo plazo y en las posibles variaciones que puedan presentarse con respecto a la demanda de agua por parte de los cultivos presentes en la zona.

Para analizar la influencia de condiciones de cambio climático en la estimación de la recarga natural del acuífero y en los requerimientos de riego de los cultivos seleccionados se utilizaron los resultados de modelos climáticos globales que distinguidas instituciones a nivel mundial han puesto a disposición del público para que los interesados realicen sus propios análisis, y a partir de allí se seleccionó el modelo climático con el que se trabajó en esta investigación. En ese sentido, para la selección del modelo climático utilizado y su posterior reducción de escala se aplicó la metodología desarrollada por Vásquez (2019). A través de dicha metodología se eligió el modelo que mejor se aproximaba al comportamiento de los datos del área de estudio mediante una comparación entre el promedio de los datos

históricos de los modelos utilizados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático con los datos medidos. El modelo seleccionado fue el CNRM-CM5 con un coeficiente de correlación de 0.75. A los datos proporcionados por este modelo se le realizó un proceso de reducción de escala obteniendo los respectivos factores multiplicadores que permitieron incorporar condiciones de cambio climático en el área de estudio.

Al estimar la recarga natural del acuífero utilizando un modelo paramétrico de simulación hidrológica a escala mensual (SIHIM), considerando condiciones de cambio climático, se observó que la recarga estimada para los períodos futuros disminuye, en comparación a la recarga estimada para el período histórico. Sin embargo, es de notar que en la fase de calibración del modelo se obtuvo un error porcentual de 38 %, mientras que las diferencias porcentuales de recarga entre los escenarios analizados (RCP 4.5 y RCP 8.5) para los períodos futuros 2023 – 2060 y 2061 – 2080 resultaron ser mucho menor que el mencionado error de calibración; por lo que dichas diferencias no son significativas, es decir, no puede afirmarse con certeza que un escenario va a ser peor que el otro.

Por otro lado, se obtuvo que para un RCP de 8.5 las láminas de precipitación y de recarga son mayores que para un RCP de 4.5. Por lo cual, podría decirse que las precipitaciones no tienden siempre a disminuir para una trayectoria de alta concentración de gases de efecto invernadero y se fortalece la idea de que el cambio climático no sólo depende directa o indirectamente de las actividades antropogénicas que modifican la composición de la atmósfera mundial, sino que depende también de la variabilidad natural del clima de cada región en particular.

Para el área de estudio, la demanda de agua por parte de cultivos representativos de la zona es significativamente mayor que la recarga natural estimada para el acuífero localizado entre los ríos Guache y Sarare, en prácticamente todos los períodos de tiempo simulados.

El análisis de sensibilidad realizado asumiendo bajo riego un 25, 50 y 75 % del área total de estudio mostró que no es factible satisfacer las necesidades de riego calculadas para los cultivos de arroz, maíz, sorgo y pasto, en relación a esos porcentajes de área regada sin hacer uso de las reservas permanentes permeables del acuífero; esto en vista de los valores de recarga natural estimados tanto para la condición histórica como para la condición futura. En consonancia con lo anterior, se determinó que la superficie máxima regable en el área de

estudio, que permite utilizar el agua subterránea con fines de riego sin afectar las reservas permanentes del acuífero, es mucho menor que la superficie planteada inicialmente.

Las condiciones climáticas influyen en la necesidad del uso de riego en un área determinada, por lo cual el uso de modelos de simulación agroclimáticos como el CROPWAT, utilizado en este trabajo, es de gran ayuda a la hora de estimar los volúmenes de agua para uso agrícola, ya que las variables que influyen directa o indirectamente sobre los datos requeridos para realizar dicha determinación son múltiples y en algunos casos complejas. Además, como se pudo evidenciar en este estudio el uso de este tipo de modelos resulta útil para la planificación y adopción de medidas de adaptación efectivas de acuerdo a la variación de los requerimientos de agua de los cultivos en el tiempo, considerando condiciones de cambio climático.

Por último, es importante señalar que el principal aporte de los Planificadores es develar los acontecimientos que podrían ocurrir en los períodos de tiempo venideros, con base a la evaluación de las necesidades presentes y futuras de la población y de los recursos disponibles para satisfacerlas; indicando los mecanismos de acción más adecuados para lograr un uso más eficiente de los recursos que se dispongan. De allí que, el contraste hecho en este trabajo en relación a la oferta – demanda de agua subterránea con fines de riego en el área estudiada, tomando en cuenta condiciones de cambio climático; y las estrategias para un uso racional del recurso derivadas de los resultados obtenidos constituyen una valiosa herramienta que sirve de apoyo a las instituciones y entes comprometidos con la planificación y desarrollo de los recursos aguas y tierras en el país, así como a las distintas agrupaciones sociales vinculadas al sector agrícola.

8.2. Recomendaciones

Realizar una investigación en relación a los cultivos y variedades más apropiadas y resilientes a las condiciones de cambio climático proyectadas para el área de estudio, y que a su vez tengan alto potencial de rendimiento y buena calidad; para analizar qué patrón de siembra es el más indicado tomando en cuenta las estimaciones hechas en este trabajo en cuanto a la disponibilidad de agua subterránea y los requerimientos hídricos de cultivos representativos de la zona como el arroz, el maíz y el sorgo.

Estimar los requerimientos de los cultivos utilizando un modelo como el AquaCrop, que aunque requiere de más parámetros y validación en campo, permite ajustar la fenología del cultivo en función de los “días grado acumulados” (GDD). El AquaCrop utiliza los GDD como reloj interno predeterminado para tener en cuenta los efectos de los regímenes de temperatura en la fenología de los cultivos; mientras que el CROPWAT no hace ajustes de la fenología en función de las condiciones ambientales.

Evaluar la calidad del agua subterránea de la zona en estudios futuros, ya que la calidad puede limitar el volumen aprovechable del recurso. En ese sentido, la calidad del agua va a afectar directamente la disponibilidad de ésta para riego, por lo que se deben revisar y ajustar los niveles de calidad requeridos de acuerdo a la normativa legal existente. Asimismo, se sugiere analizar el contenido de elementos químicos como el Arsénico que podrían estar presentes en el agua subterránea y que resultan dañinos para la vida humana y animal.

Estudiar la viabilidad del uso de aguas residuales tratadas para el riego en la zona, ya que ello podría representar una opción complementaria ante la posible escasez del recurso en tiempos futuros. La regeneración y reutilización de las aguas residuales en la agricultura tiene una gran aceptación en muchos países del mundo con escasez de agua, ya que ha sido importante para equilibrar la demanda y la oferta del recurso para diversos usos.

Evaluar en investigaciones futuras la eficiencia de los sistemas de riego utilizados en el área de estudio, ya que ello contribuirá con el uso racional del agua utilizada para estos fines, bien sea agua subterránea o agua superficial. Además, el análisis de la eficiencia de los sistemas de riego es importante para propiciar condiciones idóneas a los distintos cultivos a lo largo de su desarrollo.

Interrelacionar el uso del agua subterránea con el agua superficial en estudios venideros, que permita lograr una mayor disponibilidad y mejores tiempos de suministro del recurso con fines de riego, a la vez que dicho uso conjunto del agua para la agricultura de regadío podría constituir una estrategia de adaptación al cambio climático.

REFERENCIAS CITADAS

- Alejua, H., 2002. "Caracterización y análisis del proceso gerencial aplicado por los productores de maíz del municipio Turén, estado Portuguesa, Venezuela". Revista Agroalimentaria. Vol. 8. N° 14. Centro de Investigaciones Agroalimentarias (CIAAL). Facultad de Ciencias Económicas y Sociales. Universidad de Los Andes. Mérida - Venezuela.
- Antalia, A., 2011. "Determinación de los sistemas de flujo del agua subterránea y caracterización de sus componentes en regiones desérticas: el caso de Loreto, Baja California Sur". Tesis para obtener el grado de doctor en ciencias. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz - Baja California Sur.
- Bandes, T., 1980. "Estudio de la planicie inundable del río Acarigua". Tesis de Maestría en Desarrollo de los recursos Aguas y Tierras, mención: Planificación y Desarrollo de los recursos hidráulicos. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida - Venezuela.
- Cabrera, V., 1980. "Estimación de agua subterránea y políticas de explotación para la cuenca alta y media del río Portuguesa". Tesis de Maestría en Desarrollo de los recursos de Aguas y Tierras mención: Ingeniería de riego y drenaje. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida - Venezuela.
- Cárdenas, G. y Cárdenas, J., 2009. "Agricultura, urbanización y agua". Serie crisis global y seguridad alimentaria. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José - Costa Rica.
- Climate Explorer.* [Mayo-2022]. *About the Climate Explorer.*
<http://climexp.knmi.nl/about.cgi?id=someone@somewhere>.
- COMPUAMBIENTE Consultores C.A., 2004. "Sistema de información Geográfica del atlas hidrogeológico de Venezuela". República Bolivariana de Venezuela.
- Correa, M., 2010. "Estado Portuguesa". GeoVenezuela, tomo 6. Fundación Empresas Polar. Caracas - Venezuela.
- Custodio, E. y Llamas, M., 1976. "Hidrología subterránea". Tomo I. Primera edición. Ediciones Omega. Barcelona - España.

- Durán, L., 2011. "Las políticas hídricas en Venezuela en la gestión del agua subterránea". Revista Voces: Tecnología y pensamiento. Volumen 5, N° 1-2. Mérida - Venezuela.
- Duque, R. y Barrios, A., 1991. "Modelo de simulación hidrológica para la estimación de la escurrentía a nivel mensual". Serie: Hidrología (H6), CIDIAT-ULA. Mérida - Venezuela.
- FAO- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2006. "Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma - Italia.
- FAO- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011. "El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la Alimentación y la Agricultura". Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma - Italia.
- FAO- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2013. "Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria". Informe N° 38 sobre temas hídricos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma - Italia.
- FAO- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2017. "Trabajo estratégico de la FAO para una alimentación y una agricultura sostenibles." Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma - Italia.
- Foster, S. y Cherlet, J., 2014. "*The link between land use and groundwater: Governance provisions and management strategies to secure a sustainable harvest*". Perpestive Paper. Global Water Partnership.
- Foster, S. y Shah, T., 2012. "Aguas Subterráneas y Agricultura de regadío: haciendo una relación beneficiosa más sostenible". *Perpestive Paper. Global Water Partnership*.
- Global Water Partnership (GWP), 2015. "*Responding to the global food security challenge through coordinated land and water governance*". *Proceedings of the joint GWP – ILC – IWMI workshop*. Petronia - South África.
- Gualán, R.; Sánchez E.; Campozano, L.; Samaniego, E. y Vasquez, A., (2014). "Simplificación del proceso complejo de reducción de escala de los modelos

climáticos globales por medio de la aplicación web SDW”. MASKANA. Revista Científica multidisciplinaria. Universidad de Cuenca. Cuenca - Ecuador.

Hernández, B., 2010. “Formulación, diseño y programación de un sistema de riego presurizado para el asentamiento campesino “Santa Lucía” municipio Zea, estado Mérida”. Tesis de Maestría en Desarrollo de los recursos de Aguas y Tierras mención: Ingeniería de riego y drenaje. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida - Venezuela.

Hernández, N., 2015. “Determinación de las áreas favorables para la recarga artificial del acuífero del valle de Quíbor, estado Lara”. Tesis de Maestría en Desarrollo de los recursos Aguas y Tierras, mención: Planificación y Desarrollo de los recursos hidráulicos. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida - Venezuela.

International Union for Conservation of Nature, 2013. “*Food Security Policies: Making the ecosystem connections*”. IUCN. Gland - Switzerland.

Instituto Nacional de Estadística, 2014. “XIV Censo Nacional de Población y Vivienda” Gerencia General de Estadísticas Demográficas. Portuguesa - Venezuela.

IPCC- *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático), 2008. “El Cambio Climático y el agua”. Documento del IPCC. Ginebra - Suiza.

IPCC- *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático), 2014. “Cambio climático 2014: Informe de síntesis”. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra - Suiza.

Jé gat, H., 2014. “Las aguas subterráneas: Definición, origen, importancia”. Material docente. Maestría en Desarrollo de los recursos Aguas y Tierras, mención: Planificación y Desarrollo de los recursos hidráulicos. Curso académico 2014. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida - Venezuela.

Ley de Aguas, 2007. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 38595, de fecha 02 de enero de 2007. Asamblea Nacional. Caracas – Venezuela.

La Marea, 2019. “Cronología: cuatro décadas de evidencias científicas y negociaciones por el clima”. Revista mensual. Ejemplar Nro. 72. septiembre-octubre 2019. Argentina.

- León, J. y Portillo, A., 2008. "Marco jurídico regulador de la cogestión del recurso agua en Venezuela". Revista Forestal Latinoamericana. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida - Venezuela.
- López, R.; Hétier, J.; López, D.; Schargel, R. y Zinck, A. 2015. "Tierras Llaneras de Venezuela...tierras de buena esperanza" Consejo de Publicaciones. Universidad de Los Andes. Mérida - Venezuela.
- Martelo, M. y Pérez, M., 2010. "Estudio del impacto del cambio climático sobre la agricultura y la seguridad alimentaria en la República Bolivariana de Venezuela". Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras. Venezuela.
- MARN- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, s.f. "Base de datos hidroclimáticos". Dirección de Hidrología y Meteorología. División de Información Hidrológica y Meteorológica. Caracas - Venezuela.
- MARN- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, 2004. "Análisis de los posibles impactos de los cambios climáticos sobre los recursos hídricos en Venezuela". Proyecto VEN/00/G31. Mérida - Venezuela.
- MARN- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Fondo Mundial para el medio Ambiente, 2005. "Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela". Caracas - Venezuela.
- Mejías, J., 2005. "Evaluación integral de la disponibilidad de agua subterránea en la planicie aluvial del río Motatán, estado Trujillo". Tesis de Maestría en Desarrollo de los recursos Aguas y Tierras, mención: Planificación y Desarrollo de los recursos hidráulicos. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida - Venezuela.
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1970. "Léxico estratigráfico de Venezuela". Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Dirección de Geología. 2da edición. Editorial Sucre. Caracas - Venezuela.
- ONU- Organización de las Naciones Unidas, 2009. "El agua en un mundo de cambio". Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Organización de las Naciones Unidas. Nueva York – Estados Unidos.
- ONU- Organización de las Naciones Unidas, 2012. "Gestionar el agua en un contexto de incertidumbre y riesgo". Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Organización de las Naciones Unidas. Nueva York – Estados Unidos.

- Ovalles, F.; Cortez, A.; Rodríguez, M.; Rey, J. y Cabrera, E., 2008. "Variación geográfica en el impacto del cambio climático en el sector agrícola en Venezuela". Revista Agronomía Tropical. Maracay - Venezuela.
- Oviedo, B. y León, G., 2010. "Guía de procedimiento para la Generación de Escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales". Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá - Colombia.
- Parra, O., 2018. "Manejo del agua subterránea en el cultivo del arroz. Caso Esteller-Portuguesa". Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora". Guanare - Venezuela.
- Pereira, L.; Valero, J.; Picornell M. y Martin, J., 2010. "El riego y sus tecnologías". Centro regional de estudios del agua. Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete - España.
- Ramírez, L., 2005. "Evaluación de las disponibilidades de agua subterránea entre los ríos Morador y Sarare del estado Portuguesa". Trabajo Final de Grado para optar por el título de Ingeniero Geólogo. Universidad de Los Andes. Mérida - Venezuela.
- Razuri, L.; Rosales, J.; Juárez, L.; Hernández, J. y Romero, E., 2008. "Estimación de las demandas hídricas en la zona de Santa Rosa-Mérida, con fines de planificación del uso de los recursos hidráulicos". Universidad de Los Andes. Mérida - Venezuela.
- Rivero, J., 1998. "Estudio de la problemática de las inundaciones en tierras bajas del estado Portuguesa" Consultora ambiental Rivero. Centro para el estudio de la Biodiversidad – Universidad de los Llanos Ezequiel Zamora. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Guanare, estado Portuguesa - Venezuela.
- Romero, E.; Rodríguez, A.; Razuri, L.; Suniaga, J. y Montilla, E., 2009. "Estimación de las necesidades hídricas del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.), durante las diferentes etapas fenológicas, mediante la tina de evaporación". Revista Agricultura Andina. Volumen 16.
- Romero, M.; Gutiérrez-Ch, J. y Jégat, H., 2022. "Efecto del cambio climático sobre la recarga natural de un acuífero: Un caso de estudio en el estado Portuguesa - Venezuela". VIII Jornadas Científico Técnicas de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida - Venezuela.
- Sabino, C., 1987. "Cómo hacer una tesis: guía para elaborar y redactar trabajos científicos". Editorial Panapo. Caracas - Venezuela.

- Sadoff, C. y Muller, M.; 2010. "La Gestión del agua, la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático: efectos anticipados y respuestas esenciales". *Teck Background Papers. Global Water Partnership*.
- SIGATLAS, 2004. "Base de datos del sistema de información geográfica del atlas hidrogeológico de Venezuela". República Bolivariana de Venezuela.
- Smith, M.; Cross K.; Paden, M. y Laban, P., 2020. "Acuíferos: Gestión sostenible de las aguas subterráneas". Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (UICN). San José - Costa Rica.
- Strebin, S.; Mazzei, B., 1991. "Actualización del estudio capacidad de uso de las tierras del estado Portuguesa". Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. División de información e investigación del ambiente. Guanare, estado Portuguesa - Venezuela.
- Vásquez, F., 2019. "Variación en el potencial de riego del sistema Las Majaguas bajo condiciones de cambio climático". Tesis de Maestría en Desarrollo de los recursos Aguas y Tierras, mención: Planificación y Desarrollo de los recursos hidráulicos. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida - Venezuela.
- Vega, E. y Jara, J., 2009. "Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (Costa y Región Andina) del Ecuador". Revista Jaboticabal. Vol. 29.
- Vélez, M.; Ortiz, C. y Vargas, M., 2011. "Las aguas subterráneas. Un enfoque práctico". Colección Guías y manuales. Instituto Colombiano de Geología y Minería. INGEOMINAS. Bogotá - Colombia.
- Wilby, R. y Dawson, C., 2004. "*Using SDSM Versión 3.1 – A decisión support tool for the assessment of regional climate changes impacts*". Reino Unido.
- WorldClim [Mayo-2022]. *Global climate and weather data*. <https://www.worldclim.org/data/index.html>.
- WWF/Adena, 2005. "Curso de riego para agricultores". *World Wildlife Fund for Nature*. España.

APÉNDICES

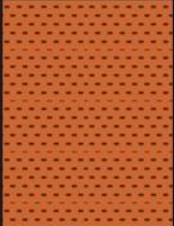




	Pág.
A. Perfiles litológicos	164
B. Secciones litológicas	170
C. Error de calibración del modelo SIHIM	173

www.bdigital.ula.ve

A. Perfiles litológicos

www.bdigital.ula.ve

PO5867008A

Escala (m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología	Descripción	Tipo
0	8	8		Arcilla	Impermeable
2					
4	4	12		Arena	Permeable
6					
8	3	15		Grava	Permeable
10					
12	6	21		Arcilla	Impermeable
14					
16	10.6	31.6		Grava	Permeable
18					
20					
22					
24					
26					
28					
30					
32					

www.bdigital.ula.ve

Coordenadas UTM

1066729.29 N

489028.48 E

Fuente: Propia.

Figura A.1. Perfil litológico N° 2.

PO5868001A



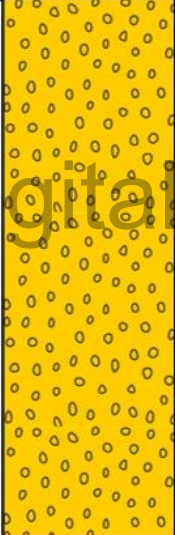

Escala (m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología	Descripción	Tipo
0					
4					
8					
12					
16	33	33		Arcilla	Impermeable
20					
24					
28					
32					
36	4.3	37.3		Grava	Permeable
40	4.3	41.6		Arcilla	Impermeable
44					
48	17.3	58.9		Grava	Permeable
52					
56					
60					
64	13.2	72.1		Arcilla	Impermeable
68					
72					
76					

Coordenadas UTM	
1059363.24 N	
478052.64 E	

Fuente: Propia.

Figura A.2. Perfil litológico N° 3.

PO5769002A

Escala (m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología	Descripción	Tipo
0	1	1		Arcilla	Impermeable
4	22	23		Grava	Permeable
8					
12	2	25		Arcilla	Impermeable
16					
20	40	65		Grava	Permeable
24					
28	3	68		Arcilla	Impermeable
32					
36	www.bdigital.ula.ve				
40					
44					
48					
52	www.bdigital.ula.ve				
56					
60					
64					
68	www.bdigital.ula.ve				

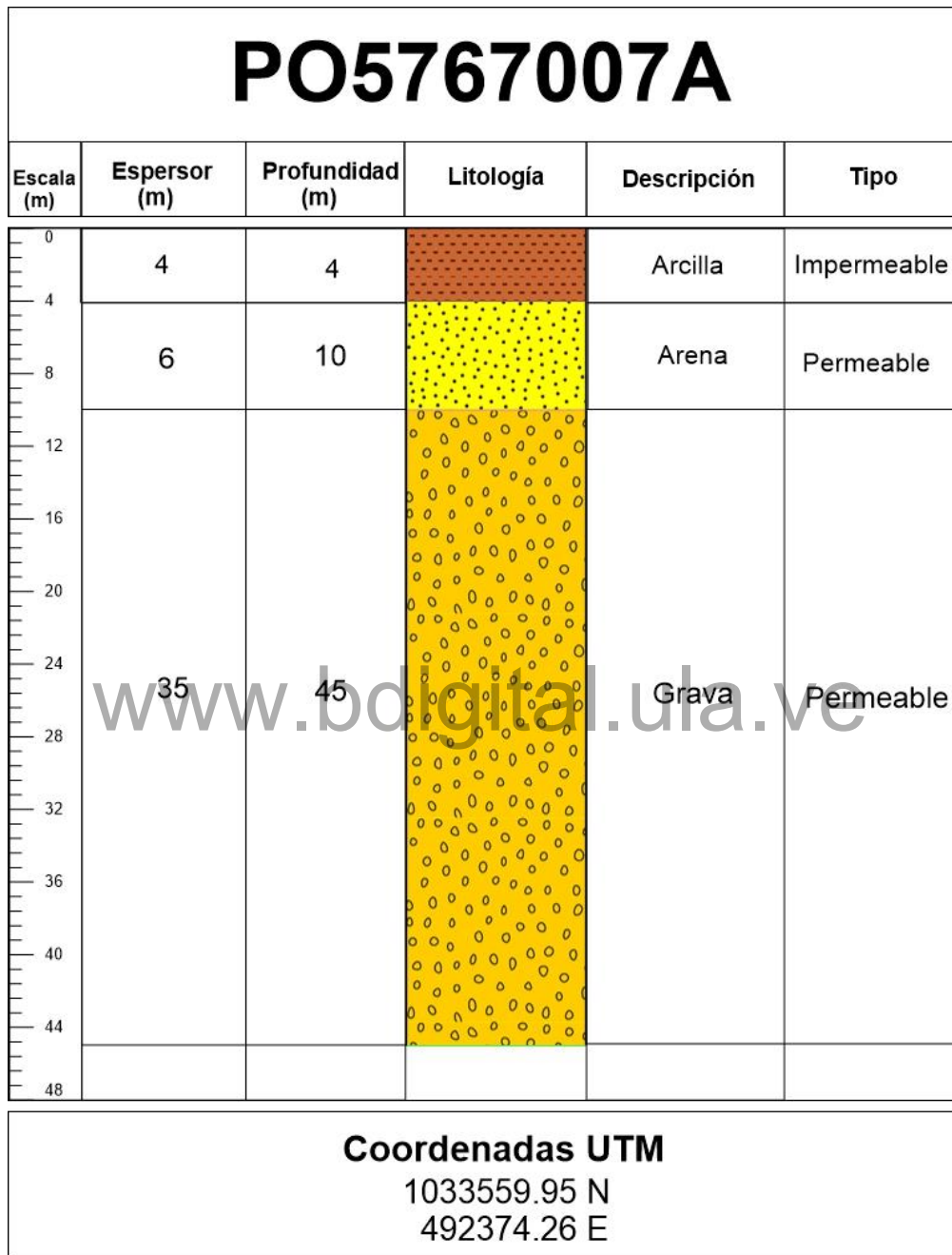
Coordenadas UTM

1037573.32 N

459129.98 E

Fuente: Propia.

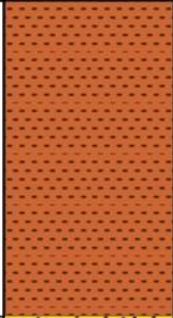

Figura A.3. Perfil litológico N° 4.



Fuente: Propia.

Figura A.4. Perfil litológico N° 5.

PO5567005A

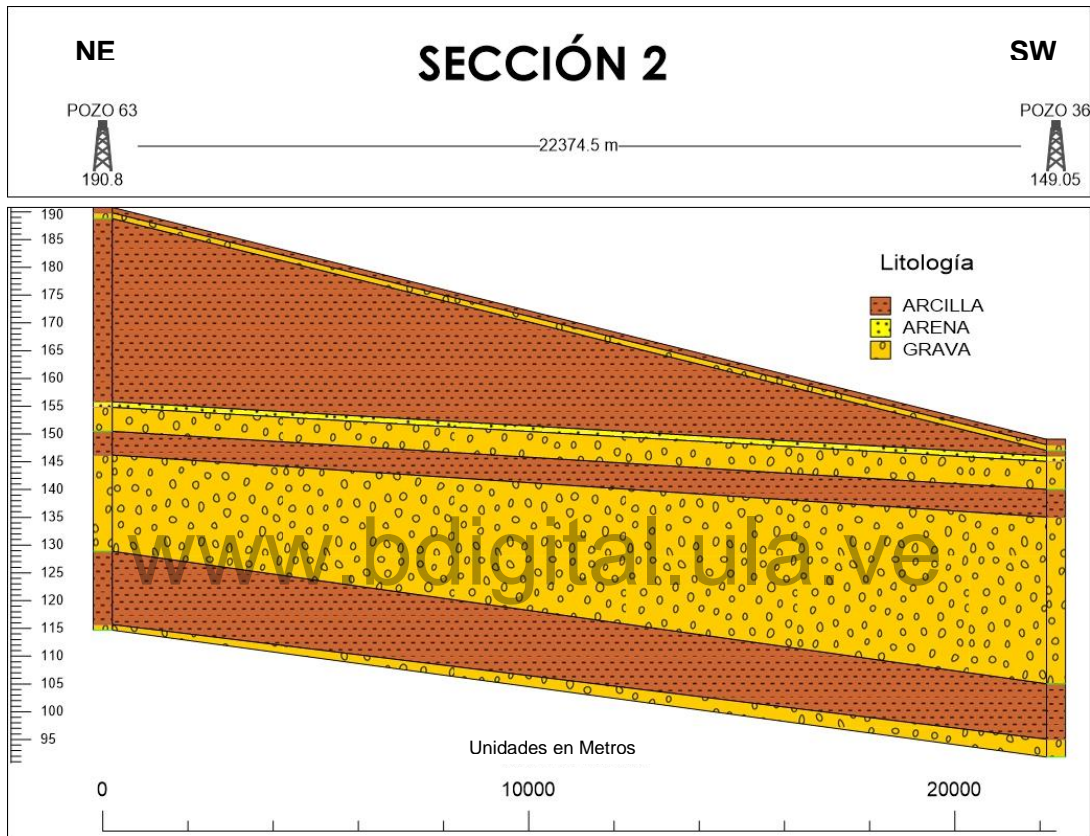
Escala (m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología	Descripción	Tipo
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32	11	11		Arcilla	Impermeable
	20,87	31,87		Arena	Permeable
Coordenadas UTM 1005919.39 N 496337.07 E					

Fuente: Propia.

Figura A.5. Perfil litológico N° 6.

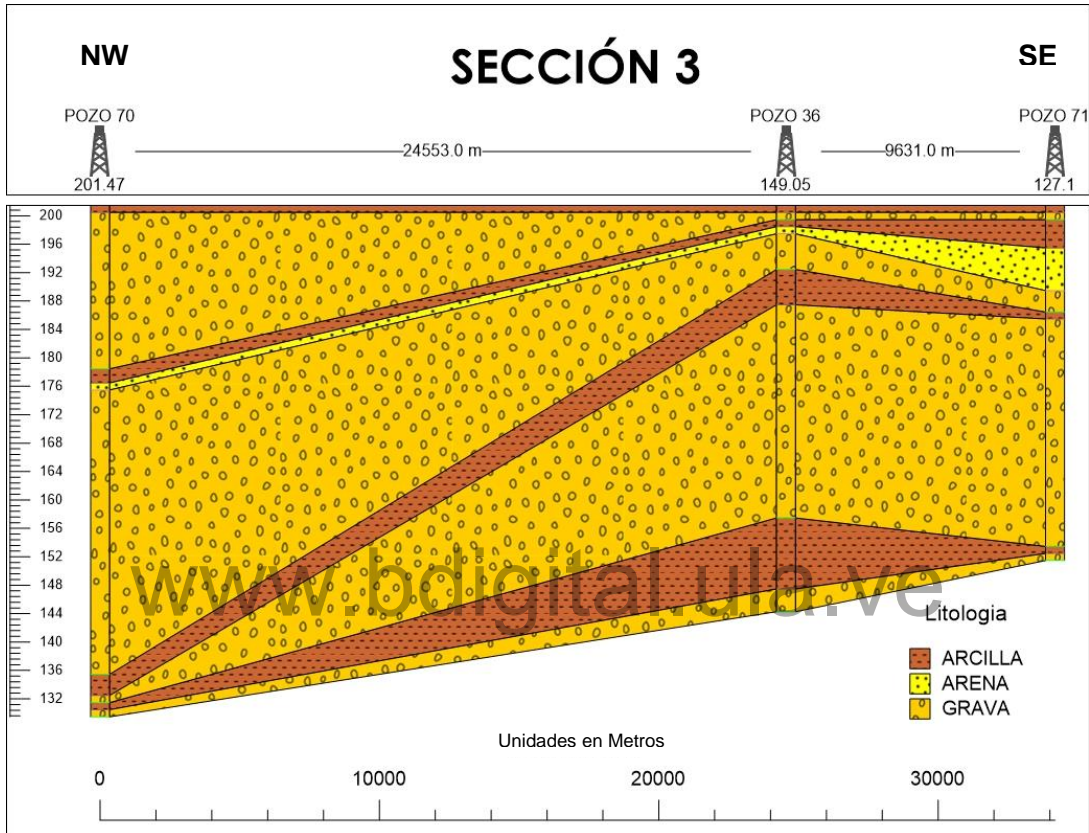
B. Secciones litológicas

www.bdigital.ula.ve



Fuente: Propia.

Figura B.1. Sección litológica N° 2.



Fuente: Propia.

Figura B.2. Sección litológica N° 3.

C. Error de calibración del modelo SIHIM

www.bdigital.ula.ve

Tabla C.1. Datos utilizados para la determinación del error en la calibración del modelo SIHIM

Datos del SIHIM utilizados para determinar el error de calibración del modelo			
Fecha	Datos observados (m ³ /s)	Datos simulados (m ³ /s)	Valor absoluto de la diferencia Obs - Sim
Ene (1975)	4.8	9.3	4.5
Feb (1975)	3.3	7.58	4.28
Mar (1975)	4.4	5.93	1.53
Abr (1975)	1.7	4.12	2.42
May(1975)	54.5	33.41	21.09
Jun (1975)	56.9	46.9	10
Jul (1975)	29.4	27.24	2.16
Ago (1975)	45.3	36.31	8.99
Sep (1975)	57	42.82	14.18
Oct (1975)	58.6	48.41	10.19
Nov (1975)	79.3	46.3	33
Dic (1975)	50.1	24.38	25.72
Ene (1976)	29.2	8.61	20.59
Feb (1976)	17.2	5.96	11.24
Mar (1976)	16.4	3.79	12.61
Abr (1976)	41.7	38.82	2.88
May (1976)	39.3	85.83	46.53
Jun (1976)	218.4	131.04	87.36
Jul (1976)	143.1	114.07	29.03
Ago (1976)	40.4	61.8	21.4
Sep (1976)	23.5	39.37	15.87
Oct (1976)	15	17.95	2.95
Nov (1976)	11.7	14.38	2.68
Dic (1976)	5.8	8.77	2.97
Ene (1977)	3.3	5	1.7
Feb (1977)	2.6	3.69	1.09
Mar (1977)	2.7	2.26	0.44
Abr (1977)	2.6	1.53	1.07
May (1977)	9.5	18.68	9.18
Jun (1977)	25.8	67.81	42.01
Jul (1977)	52.1	76.09	23.99
Ago (1977)	33.9	57.9	24
Sep (1977)	33.4	50.19	16.79

Datos del SIHIM utilizados para determinar el error de calibración del modelo			
Fecha	Datos observados (m ³ /s)	Datos simulados (m ³ /s)	Valor absoluto de la diferencia Obs - Sim
Oct (1977)	50.1	44.06	6.04
Nov (1977)	66.5	36.57	29.93
Dic (1977)	28.1	11.16	16.94
Ene (1978)	14.4	7.18	7.22
Feb (1978)	10.6	5.15	5.45
Mar (1978)	8.5	3.17	5.33
Abr (1978)	33.5	24.79	8.71
May (1978)	106.6	89.65	16.95
Jun (1978)	163.9	103.79	60.11
Jul (1978)	109.4	81.77	27.63
Ago (1978)	51	53.62	2.62
Sep (1978)	45.6	53.26	7.66
Oct (1978)	34.3	37.86	3.56
Nov (1978)	37.2	39.72	2.52
Dic (1978)	16	14.47	1.53
Ene (1979)	9	8.21	0.79
Feb (1979)	6.2	6.05	0.15
Mar (1979)	9.1	8.05	1.05
Abr (1979)	14.9	38.4	23.5
May (1979)	59.9	59.06	0.84
Jun (1979)	69.7	77.89	8.19
Jul (1979)	56.3	62.41	6.11
Ago (1979)	41.5	55.56	14.06
Sep (1979)	25.7	40.91	15.21
Oct (1979)	59.5	72.73	13.23
Nov (1979)	35.8	46.53	10.73
Dic (1979)	35.9	36.44	0.54
Ene (1980)	10.3	11.63	1.33
Feb (1980)	3.3	7.84	4.54
Mar (1980)	1.9	4.9	3
Abr (1980)	4.3	8.94	4.64
May (1980)	31.1	47.57	16.47
Jun (1980)	107.2	89.12	18.08
Jul (1980)	108.6	83.32	25.28
Ago (1980)	66.9	63.44	3.46

Datos del SIHIM utilizados para determinar el error de calibración del modelo			
Fecha	Datos observados (m ³ /s)	Datos simulados (m ³ /s)	Valor absoluto de la diferencia Obs - Sim
Sep (1980)	38.2	41.15	2.95
Oct (1980)	43.1	43.82	0.72
Nov (1980)	35.8	23.92	11.88
Dic (1980)	18.6	11.89	6.71
Ene (1981)	11	7.21	3.79
Feb (1981)	11	10.09	0.91
Mar (1981)	9.5	4.8	4.7
Abr (1981)	41.8	73.33	31.53
May (1981)	101	115.99	14.99
Jun (1981)	169.6	133.55	36.05
Jul (1981)	40.6	56.22	15.62
Ago (1981)	24.8	34.43	9.63
Sep (1981)	51.3	57.59	6.29
Oct (1981)	69	77.77	8.77
Nov (1981)	26.8	24.38	2.42
Dic (1981)	29.3	37.36	8.06
Ene (1982)	7.9	10.9	3
Feb (1982)	1.7	8	6.3
Mar (1982)	1.2	4.62	3.42
Abr (1982)	36.6	35.72	0.88
May (1982)	64	84.05	20.05
Jun (1982)	122.9	89.87	33.03
Jul (1982)	142.1	97.2	44.9
Ago (1982)	50.1	64.13	14.03
Sep (1982)	23.4	35.12	11.72
Oct (1982)	23.8	30.17	6.37
Nov (1982)	48.7	32.71	15.99
Dic (1982)	24.2	20.54	3.66
Ene (1983)	18.9	13.91	4.99
Feb (1983)	8.7	9.57	0.87
Mar (1983)	9.5	5.86	3.64
Abr (1983)	51.2	56.75	5.55
May (1983)	139.1	99.02	40.08
Jun (1983)	184.2	87.57	96.63
Jul (1983)	225.3	74.74	150.56

Datos del SIHIM utilizados para determinar el error de calibración del modelo			
Fecha	Datos observados (m ³ /s)	Datos simulados (m ³ /s)	Valor absoluto de la diferencia Obs - Sim
Ago (1983)	112.4	55.34	57.06
Sep (1983)	55.3	46.1	9.2
Oct (1983)	41.8	57.03	15.23
Nov (1983)	41.5	29.94	11.56
Dic (1983)	17.9	28.77	10.87
Ene (1984)	7.5	11.12	3.62
Feb (1984)	14.5	8.29	6.21
Mar (1984)	2.5	4.87	2.37
Abr (1984)	12.1	3.8	8.3
May (1984)	13.5	4.51	8.99
Jun (1984)	29.5	39.34	9.84
Jul (1984)	14.6	33.31	18.71
Ago (1984)	20.2	39.72	19.52
Sep (1984)	75.9	48.82	27.08
Oct (1984)	58.2	54.33	3.87
Nov (1984)	16.2	37.75	21.55
Dic (1984)	6.7	13.1	6.4
Ene (1985)	5.4	7.86	2.46
Feb (1985)	4.4	5.82	1.42
Mar (1985)	1.6	3.6	2
Abr (1985)	2.2	3.85	1.65
May (1985)	8.5	18.56	10.06
Jun (1985)	32	49.56	17.56
Jul (1985)	8.8	38.37	29.57
Ago (1985)	13.5	37.99	24.49
Sep (1985)	13.3	43.48	30.18
Oct (1985)	47.2	59.47	12.27
Nov (1985)	12.3	23.65	11.35
Dic (1985)	9.9	13.6	3.7
Ene (1986)	3.7	8.1	4.4
Feb (1986)	2.1	6.3	4.2
Mar (1986)	2.5	4.61	2.11
Abr (1986)	4.9	10.77	5.87
May (1986)	26.2	54.37	28.17
Jun (1986)	90.6	97.89	7.29

Datos del SIHIM utilizados para determinar el error de calibración del modelo			
Fecha	Datos observados (m ³ /s)	Datos simulados (m ³ /s)	Valor absoluto de la diferencia Obs - Sim
Jul (1986)	63.1	69.59	6.49
Ago (1986)	51.9	65.84	13.94
Sep (1986)	37.2	66.07	28.87
Oct (1986)	47.5	54.15	6.65
Nov (1986)	92	53	39
Dic (1986)	27.4	26.46	0.94
Ene (1987)	7.4	12.22	4.82
Feb (1987)	1.5	8.74	7.24
Mar (1987)	1.3	5.32	4.02
Abr (1987)	2.9	3.89	0.99
May (1987)	4.8	25.76	20.96
Jun (1987)	25.5	47.21	21.71
Jul (1987)	65.4	85.38	19.98
Ago (1987)	15.7	44.74	29.04
Sep (1987)	15.1	30.02	14.92
Oct (1987)	15.1	38.35	23.25
Nov (1987)	3.6	27.04	23.44
Dic (1987)	2.4	14.03	11.63
	Promedio	37.67	

Fuente: Propia.

Tabla C.2. Resumen del error obtenido en la fase de calibración del modelo SIHIM

Resumen del error de calibración del modelo SIHIM		
Promedio Error absoluto	14.33	m ³ /s
Error relativo	0.3804	
Error porcentual	38	%
Desviación Estándar	18.41	

Fuente: Propia.

Tabla C.3. Diferencia porcentual de la recarga entre los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5

Diferencia (en %) de la recarga entre los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5			
Período	Disminución de la recarga (%) en relación al período histórico		Diferencia porcentual de la recarga entre escenarios
	RCP 4.5	RCP 8.5	
Histórico 1998 - 2022	-----	-----	-----
Futuro 2023 - 2060	37.6	32	5.6
Futuro 2061 - 2080	38.3	35.8	2.5

www.bdigital.ula.ve

Fuente: Propia.