



TRABAJO DE GRADO

COMPARACIÓN DE UN BALANCE HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO
CHECUA HACIENDO USO DE MÉTODOS TRADICIONALES (ESTACIONES
METEOROLÓGICAS) Y DE SENSORES REMOTOS (TELEDETECCIÓN), A
PARTIR DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

CRISTIAN GIOVANI PINEDA CORTES
NATHALY GUTIERREZ DE PIÑERES DÍAZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE RECURSOS HÍDRICOS
BOGOTÁ D.C

2020

TRABAJO DE GRADO

COMPARACIÓN DE UN BALANCE HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO
CHECUA HACIENDO USO DE MÉTODOS TRADICIONALES (ESTACIONES
METEOROLÓGICAS) Y DE SENSORES REMOTOS (TELEDETECCIÓN), A
PARTIR DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

CRISTIAN GIOVANI PINEDA CORTES

NATHALY GUTIERREZ DE PIÑERES DÍAZ

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Recursos
Hídricos

Docente

DANIEL ANDRÉS LÓPEZ SABOGAL
INGENIERO AMBIENTAL
MSC. EN RECURSOS HÍDRICOS

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRICOS

BOGOTÁ D.C

2020



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a Dios por habernos acompañado y darnos la salud, bienestar y la guía para lograr culminar un peldaño más en nuestra carrera profesional y brindarnos una vida llena de aprendizaje y experiencias.

Damos gracias, a la Universidad Católica de Colombia, que nos brindó las herramientas necesarias para realizar nuestros estudios en la especialización de Recurso Hídrico.

Le agradecemos a nuestro tutor el ingeniero Daniel Andrés López Sabogal, por la confianza, tiempo, apoyo y dedicación de su tiempo y haber compartido su conocimiento con nosotros.

Finalmente, le damos gracias a nuestros padres por todo el apoyo, amor y cariño brindado a lo largo de nuestras vidas y su apoyo constante a cada uno de nuestros proyectos de vida.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| 1. GENERALIDADES | 19 |
| 1.1. Línea de Investigación | 19 |
| 1.2. Planteamiento del Problema | 19 |
| 1.2.1. Antecedentes del problema | 20 |
| 1.2.2. Pregunta de investigación | 22 |
| 1.2.3. Variables del problema | 22 |
| 1.3. Justificación | 23 |
| 2. OBJETIVOS | 26 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL | 26 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 26 |
| 3. MARCOS DE REFERENCIA | 27 |
| 3.1. MARCO CONCEPTUAL | 27 |
| 3.1.1. Hidrología. | 27 |
| 3.1.2. Ciclo Hidrológico. | 27 |
| 3.1.3. Precipitación. | 29 |
| 3.1.4. Evaporación. | 30 |
| 3.1.5. Transpiración. | 31 |
| 3.1.6. Evapotranspiración. | 31 |
| 3.1.7. Evapotranspiración Potencial (ETP). | 32 |
| 3.1.8. Evapotranspiración Real (ETR) | 32 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.1.9. | Escorrentía. | 32 |
| 3.1.10. | Infiltración y Percolación. | 32 |
| 3.1.11. | Almacenamiento del suelo. | 33 |
| 3.1.12. | Cuenca Hidrográfica. | 33 |
| 3.1.13. | Corporaciones Autónomas Regionales | 34 |
| 3.1.14. | Estaciones Meteorológicas. | 35 |
| 3.1.15. | Estación Pluviométrica (PM). | 35 |
| 3.1.16. | Estación Pluviográfica (PG). | 35 |
| 3.1.17. | Estación Climatológica Principal (CP). | 35 |
| 3.1.18. | Estación Climatológica Ordinaria (CO). | 35 |
| 3.1.19. | Estación Sinóptica Principal (SP). | 36 |
| 3.1.20. | Estación Sinóptica Suplementaria (SS). | 36 |
| 3.1.21. | Sistemas de Información Geográfica (SIG). | 36 |
| 3.1.22. | Teledetección - Percepción Remota. | 36 |
| 3.1.23. | Sensores Remotos. | 37 |
| 3.1.24. | Sensores Pasivos. | 37 |
| 3.1.25. | Sensores Activos. | 38 |
| 3.1.26. | Reflectancia de las superficies terrestres. | 38 |
| 3.1.27. | Espectro Electromagnético. | 39 |
| 3.1.28. | Imágenes Satelitales. | 40 |
| 3.1.29. | Imágenes de teledetección | 42 |
| 3.1.30. | Análisis de Sensibilidad | 44 |
| 3.2. | MARCO TEÓRICO | 45 |
| 3.2.1. | Balance Hídrico. | 45 |
| 3.2.2. | Método directo o Balances Hídricos Climáticos (BHC) | 46 |
| 3.2.2.1. | Procedimiento para el desarrollo del método directo o Balances | |

| | |
|---|----|
| Hídricos Climáticos (BHC). | 47 |
| 3.2.3. Métodos de Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP) | 51 |
| 3.2.3.1. Método de Thornthwaite | 52 |
| 3.2.4. Monitoreo Ambiental desde Satélites. | 53 |
| 3.2.5. Fundamentos Físicos de la Teledetección. | 55 |
| 3.2.6. Interacción Tierra-Radiación | 57 |
| 3.2.7. Interacción Atmosfera-Radiación | 59 |
| 3.2.8. Comportamiento Tierra-atmósfera frente a la Radiación Electromagnética. | 61 |
| 3.3. MARCO GEOGRÁFICO | 64 |
| 3.3.1. Ubicación Geográfica, Jurisdicción Administrativa y Posición Geográfica. | 64 |
| 3.3.2. Hidrografía | 66 |
| 3.3.3. Fisiografía | 69 |
| 3.3.4. Geología General del Río Checua. | 70 |
| 3.3.5. Suelos | 72 |
| 3.3.5.1. Área Plana De La Cuenca Del Río Checua | 73 |
| 3.3.5.2. Área de Vertiente de la Cuenca del Río Checua | 74 |
| 3.3.6. Vegetación. | 76 |
| 3.3.6.1. Primer Paisaje – La Planicie | 78 |
| 3.3.6.2. Segundo Paisaje – Cerros y Laderas Orientales | 79 |
| 3.3.6.3. Tercer Paisaje – Laderas Desérticas Erosionadas | 79 |
| 3.3.6.4. Cuarto Paisaje – Laderas de Patio Bonito, Pajarito y Cerro Verde | 80 |
| 3.3.6.5. Quinto Paisaje – Laderas Occidentales | 80 |
| 3.3.7. Caracterización Climática | 80 |
| 3.4. ESTADO DEL ARTE | 81 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 3.4.1. | Aplicaciones de la teledetección en hidrología: estimación de la evapotranspiración mediante el método del triángulo. | 81 |
| 3.4.2. | Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales. | 83 |
| 3.4.3. | Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. | 85 |
| 4. | METODOLOGÍA | 88 |
| 4.1. | FASES DEL TRABAJO DE GRADO. | 88 |
| 4.1.1. | Fase 1: Obtención de información. | 88 |
| 4.1.2. | Fase 2: Balance Hídrico. | 98 |
| 4.1.3. | Fase 3: Resultados | 99 |
| 4.2. | INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS | 102 |
| 4.3. | ALCANCES Y LIMITACIONES | 104 |
| 5. | PRODUCTOS A ENTREGAR | 106 |
| 6. | ENTREGA DE RESULTADOS E IMPACTOS ESPERADOS | 108 |
| 7. | DESARROLLO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN | 110 |
| 7.1. | CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA. | 110 |
| 7.1.1. | Morfometría de la Cuenca del Río Checua | 110 |
| 7.1.1.1. | Paso para la delimitación de la cuenca del Río Checua | 111 |
| 7.1.1.2. | Caracterización de la cuenca del Río Checua | 115 |
| 7.1.1.2.1. | Área de la cuenca del Río Checua | 116 |
| 7.1.1.2.2. | Perímetro de la cuenca del Río Checua | 117 |
| 7.1.1.2.3. | Índice de compacidad o índice de Gravelius (kc) | 118 |
| 7.1.1.2.4. | Factor de forma | 120 |
| 7.1.1.2.5. | Índice de alargamiento | 121 |
| 7.1.1.2.6. | Elevación o altura media de la cuenca (curva hipsométrica) | 123 |
| 7.1.1.2.7. | Pendiente media de la cuenca | 129 |

| | |
|---|-----|
| 7.1.2. Características del sistema de drenaje de la Cuenca del Rio Checua | 133 |
| 7.1.2.1.1. Longitud del cauce principal | 133 |
| 7.1.2.1.2. Pendiente media del cauce principal | 134 |
| 7.1.2.1.3. Orden de Drenaje | 136 |
| 7.1.2.1.4. Densidad de Drenaje | 137 |
| 7.2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA | 139 |
| 7.2.1. Análisis de la información meteorológica obtenida. | 139 |
| 7.2.1.1. Estaciones meteorológicas. | 139 |
| 7.2.1.1.1. Precipitación | 145 |
| 7.2.1.1.2. Precipitación media sobre la cuenca | 146 |
| 7.2.1.1.3. Otros parámetros meteorológicos. | 153 |
| 7.2.1.2. Teledetección – Sensores Remotos (satélites Meteorológicos) | 163 |
| 7.2.1.2.1. Precipitación | 167 |
| 7.2.1.2.2. Precipitación media sobre la cuenca | 167 |
| 7.2.1.2.3. Temperatura. | 169 |
| 7.2.1.3. Análisis comparativo de la precipitación y temperatura media mensual multianual obtenida de los métodos convencionales y teledetección (periodo de lluvias 1998 – 2018). | 174 |
| 7.3. BALANCES HIDRICOS | 177 |
| 7.3.1. Método tradicional (estaciones meteorológicas – CAR). | 182 |
| 7.3.1.1. Periodo común de lluvias 30 años (1988 – 2018) | 182 |
| 7.3.1.2. Periodo común de lluvias 20 años (1998 – 2018) | 189 |
| 7.3.2. Método por teledetección (sensores remotos – satélite – TRRM) | 198 |
| 7.3.3. Comparación resultados del BHC por método tradicional vs método de teledetección – Periodo común 1998 – 2018. | 206 |
| 7.4. ANALISIS DE SENSIBILIDAD | 208 |

| | |
|--------------------|-----|
| 8. CONCLUSIONES | 214 |
| 9. RECOMENDACIONES | 219 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA | 220 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| FIGURA 1. COMPORTAMIENTO DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA TIERRA..... | 57 |
| FIGURA 2. INTERACCIÓN RADIACIÓN-SUELO. | 58 |
| FIGURA 3. CURVA DE REFLECTIVIDAD. | 59 |
| FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR..... | 61 |
| FIGURA 5. RADIACIÓN TERRESTRE (SUPERFICIE + ATMOSFERA)..... | 63 |
| FIGURA 6. ABSORCIÓN DE GASES ATMOSFÉRICOS. | 64 |
| FIGURA 7. JURISDICCIÓN ADMINISTRATIVA CUENCA DEL RÍO CHECUA. | 65 |
| FIGURA 8. LIMITACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA | 66 |
| FIGURA 9. RED HIDROGRÁFICA DE LOS MUNICIPIOS DE NEMOCÓN, COGUA, TAUSA, CUCUNUBÁ Y SUESCA | 68 |
| FIGURA 10. ÁREAS PROTEGIDAS DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA..... | 78 |
| FIGURA 11. PROCEDIMIENTO DESARROLLADO EN LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL ARCGIS PARA LA DELIMITACIÓN DE LA CUENCA DEL RIO CHECUA. | 111 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | Pág. |
|---|-------------|
| ILUSTRACIÓN 1. DISTRIBUCIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS EN COLOMBIA..... | 24 |
| ILUSTRACIÓN 2. CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA | 29 |
| ILUSTRACIÓN 3. CUENCA, SUBCUENCA Y MICROCUENCA | 34 |
| ILUSTRACIÓN 4. SENSOR PASIVO..... | 38 |
| ILUSTRACIÓN 5. SENSOR ACTIVO..... | 38 |
| ILUSTRACIÓN 6. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO..... | 40 |
| ILUSTRACIÓN 7. FORMATO DE IMAGEN DIGITAL (7x9 PÍXELES). | 41 |

| | |
|--|-----|
| ILUSTRACIÓN 8. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA Y LOCALIZACIÓN DE LAS SIETE ESTACIONES METEOROLÓGICAS..... | 90 |
| ILUSTRACIÓN 9. PÁGINA DE INICIO DEL SATÉLITE TROPICAL RAINFALL MEASURING MISSION – TRMM | 92 |
| ILUSTRACIÓN 10. PÁGINA SERVIDOR GIOVANNI DE LA NASA..... | 93 |
| ILUSTRACIÓN 11. RANGO DE TIEMPO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES | 93 |
| ILUSTRACIÓN 12. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO –SERVIDOR GIOVANNI | 94 |
| ILUSTRACIÓN 13. SELECCIONADOR DE LA VARIABLE CLIMATOLÓGICA A DESCARGAR | 95 |
| ILUSTRACIÓN 14. SELECCIONADOR DE SATÉLITES CON DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN | 96 |
| ILUSTRACIÓN 15. IMAGEN SATELITAL DE LA PRECIPITACIÓN DEL SATÉLITE NOAH0125...97 | 97 |
| ILUSTRACIÓN 16. PÁGINA DE REGISTRO SATÉLITE DE LA NASA..... | 97 |
| ILUSTRACIÓN 17. RESUMEN DE LA METODOLOGÍA DE LAS FASES DE TRABAJO DE LA INVESTIGACIÓN. | 102 |
| ILUSTRACIÓN 18. PÁGINA SERVIDOR ASF ALASKA DE LA NASA. | 110 |
| ILUSTRACIÓN 19. PÁGINA SERVIDOR ASF ALASKA DE LA NASA. | 112 |
| ILUSTRACIÓN 20. MODELO DE ELEVACIÓN DEL TERRENO (DEM) EN 3D DE LA ZONA DE ESTUDIO - ARCGIS..... | 113 |
| ILUSTRACIÓN 21. DEFINE PROJECT DEM..... | 114 |
| ILUSTRACIÓN 22. CORRECCIÓN DEL DEM (FILL)..... | 114 |
| ILUSTRACIÓN 23. DIRECCIÓN DEL FLUJO..... | 114 |
| ILUSTRACIÓN 24. ACUMULACIÓN DEL FLUJO..... | 114 |
| ILUSTRACIÓN 25. CREACIÓN PUNTO DE CIERRE DE LA CUENCA (COORDENADAS GEOGRÁFICAS)..... | 114 |
| ILUSTRACIÓN 26. ASIGNACIÓN ELEVACIÓN PUNTO DE CIERRE DE LA CUENCA (DESEMBOCADURA)..... | 114 |
| ILUSTRACIÓN 27. CUENCA DEL RÍO CHECUA – RASTER (WATERSHED)..... | 115 |
| ILUSTRACIÓN 28. CUENCA DEL RÍO CHECUA – POLÍGONO. (RASTER TO POLYGON). | 115 |
| ILUSTRACIÓN 29. DELIMITACIÓN CAUCES PRIMARIOS - DEM (CON). | 115 |
| ILUSTRACIÓN 30. DELIMITACIÓN CAUCES PRIMARIOS - CUENCA (CON + EXTRACT BY MASK)..... | 115 |
| ILUSTRACIÓN 31. DELIMITACIÓN CAUCES PRIMARIOS (RASTER TO POLYLINE)..... | 115 |
| ILUSTRACIÓN 32. CUENCA RÍO CHECUA CON SU CAUCE PRINCIPAL..... | 115 |
| ILUSTRACIÓN 33. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA RÍO CHECUA CON EL PROCESAMIENTO DE | |

| | |
|---|-----|
| UN DEM EN EL PROGRAMA ARCGIS Y DE HERRAMIENTAS SIG..... | 117 |
| ILUSTRACIÓN 34. RESULTADOS DEL ÁREA Y PERÍMETRO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA POR MEDIO DEL PROGRAMA ARCGIS. | 118 |
| ILUSTRACIÓN 35. FORMA DE LA CUENCA DE ACUERDO CON EL TRAZADO EN ARCGIS. .. | 119 |
| ILUSTRACIÓN 36. PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA LONGITUD AXIL MÁXIMA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA DE ACUERDO CON EL TRAZADO EN ARCGIS. | 121 |
| ILUSTRACIÓN 37. ALTURA MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA DETERMINADA POR MEDIO DEL PROGRAMA ARCGIS. | 124 |
| ILUSTRACIÓN 38. ALTURAS Y ÁREAS ENTRE CURVAS DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA DETERMINADAS POR EL DEM DE LA ZONA DE ESTUDIO Y CONVERTIDAS A POLÍGONO (SHAPE). | 125 |
| ILUSTRACIÓN 39. PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA DETERMINADA POR MEDIO DEL PROGRAMA ARCGIS. | 130 |
| ILUSTRACIÓN 40. RESULTADO DE LA LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA POR MEDIO DEL PROGRAMA ARCGIS..... | 134 |
| ILUSTRACIÓN 41. RED DE DRENAJES DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA, REALIZADAS POR MEDIO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA – SIC (ARCGIS). | 137 |
| ILUSTRACIÓN 42. INSUMOS PARA LA COMPLEMENTACIÓN DE VACÍOS POR EL MÉTODO IDW. | 143 |
| ILUSTRACIÓN 43. RESULTADOS DE LOS POLÍGONOS DE THIESSEN DE LAS SIETE ESTACIONES METEOROLÓGICAS CON SU RESPECTIVA ÁREA Y FACTOR POR ESTACIÓN. | 147 |
| ILUSTRACIÓN 44. DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA POR MEDIO DEL MÉTODO DE ISOYETAS..... | 147 |
| ILUSTRACIÓN 45. RESULTADO DE LA BÚSQUEDA EN EL SENSOR REMOTO GIOVANNI PARA EL PARÁMETRO DE PRECIPITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. | 164 |
| ILUSTRACIÓN 46. IMAGEN SATELITAL DE LA PRECIPITACIÓN OBTENIDA DEL SATÉLITE TRMM_3B43 V7 DE LA ZONA DE ESTUDIO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA POR SUS COORDENADAS GEOGRÁFICAS. | 165 |
| ILUSTRACIÓN 47. RESULTADO DE LA BÚSQUEDA EN EL SENSOR REMOTO GIOVANNI PARA EL PARÁMETRO DE TEMPERATURA DE LA ZONA DE ESTUDIO..... | 170 |
| ILUSTRACIÓN 48. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA – MÉTODO ESTACIONES METEOROLÓGICAS (30 AÑOS) - PROGRAMA INNERSOFT – BALANCE HÍDRICO ISBH V0.9. | 188 |
| ILUSTRACIÓN 49. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA – MÉTODO | |

| | |
|---|-----|
| ESTACIONES METEOROLÓGICAS (20 AÑOS) - PROGRAMA INNERSOFT – BALANCE HÍDRICO ISBH v0.9. | 196 |
| ILUSTRACIÓN 50. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA – MÉTODO TELEDETECCIÓN (20 AÑOS) - PROGRAMA INNERSOFT – BALANCE HÍDRICO ISBH v0.9. | 204 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| TABLA 1. FORMATO PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO | 51 |
| TABLA 2. JURISDICCIÓN ADMINISTRATIVA CUENCA DEL RÍO CHECUA..... | 65 |
| TABLA 3. POSICIÓN ASTRONÓMICA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA. | 66 |
| TABLA 4. UNIDAD HIDROGRÁFICA DEL RÍO CHECUA | 68 |
| TABLA 5. ESTACIONES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS PARA EL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA..... | 89 |
| TABLA 6. GENERACIÓN DE NUEVAS APLICACIONES TECNOLÓGICAS PARE EL CONOCIMIENTO | 109 |
| TABLA 7. PROCEDIMIENTO PARA LA DELIMITACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA A PARTIR DE UN DEM Y LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL ARCGIS..... | 115 |
| TABLA 8. CLASIFICACIÓN DE ÁREAS..... | 116 |
| TABLA 9. ÍNDICE DE GRAVELUIS (K_C)..... | 118 |
| TABLA 10. CLASIFICACIÓN DE LA CUENCA DE ACUERDO AL FACTOR DE FORMA (K_F) | 120 |
| TABLA 11. CLASIFICACIÓN DE LA CUENCA DE ACUERDO AL ÍNDICE DE ALARGAMIENTO (L_A) | 122 |
| TABLA 12. RESUMEN DE ALTURAS Y ÁREAS ENTRE CURVAS DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA. | 126 |
| TABLA 13. CÁLCULO DE LA ELEVACIÓN MEDIA POR EL MÉTODO DE LAS FRANJAS DE ÁREA | 127 |
| TABLA 14. CLASIFICACIÓN DE LAS CUENCAS DE ACUERDO A SU PENDIENTE MEDIA | 130 |
| TABLA 15. CALCULO DE LA PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA..... | 131 |
| TABLA 16. CALCULO DE LA PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL..... | 135 |
| TABLA 17. CLASIFICACIÓN DE LAS CUENCAS DE ACUERDO A SU PENDIENTE MEDIA | 137 |
| TABLA 18. RESUME DEL ESTADO DE LOS REGISTROS DE LA INFORMACIÓN DEL PARÁMETRO | |

| | |
|---|-----|
| DE PRECIPITACIONES DE LAS ESTACIONES ESCOGIDAS PARA LA INVESTIGACIÓN. ... | 140 |
| TABLA 19. RESUME DEL ESTADO DE LOS REGISTROS DE LA INFORMACIÓN DEL PARÁMETRO DE PRECIPITACIONES DE LAS ESTACIONES ESCOGIDAS PARA LA INVESTIGACIÓN CONFORME AL PERIODO DEFINIDO PARA LAS LLUVIAS..... | 141 |
| TABLA 20. RESULTADO DE LAS CORRELACIONES DE LAS ESTACIONES POR EL MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL. | 144 |
| TABLA 21. PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA POR MEDIO DEL MÉTODO DE LOS POLÍGONOS DE THIESSEN - PERIODO COMÚN 1988-2018. | 148 |
| TABLA 22. VALORES DE PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN Y LOS PROGRAMAS ARCGIS Y EXCEL – PERIODO COMÚN 1988-2018..... | 149 |
| TABLA 23. PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA POR MEDIO DEL MÉTODO DE LOS POLÍGONOS DE THIESSEN - PERIODO COMÚN 1998-2018. | 151 |
| TABLA 24. VALORES DE PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN Y LOS PROGRAMAS ARCGIS Y EXCEL – PERIODO COMÚN 1998-2018..... | 151 |
| TABLA 25. VALORES DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL OBTENIDOS DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA PRINCIPAL CHECUA – PERIODO 1988-2018..... | 155 |
| TABLA 26. VALORES DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL OBTENIDOS DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA PRINCIPAL CHECUA – PERIODO 1998-2018..... | 157 |
| TABLA 27. VALORES DE PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL Y PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA OBTENIDOS DEL SATÉLITE TRMM_3B43 V7 Y EL PROCESAMIENTO EN EL PROGRAMA EXCEL – PERIODO COMÚN 1998-2018..... | 168 |
| TABLA 28. VALORES DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL OBTENIDOS DEL SATÉLITE METEOROLÓGICO MERRA-2 MODEL M2TMNXFLX V5 Y EL PROCESAMIENTO EN EL PROGRAMA EXCEL – PERIODO COMÚN 1998-2018..... | 172 |
| TABLA 29. OPERACIONES Y RESTRICCIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS DIFERENTES PARÁMETROS DEL BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO..... | 179 |
| TABLA 30. VALORES DE PRECIPITACIÓN TOTAL Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN Y LOS PROGRAMAS ARCGIS Y EXCEL (30 AÑOS)..... | 183 |
| TABLA 31. CALCULO DE LA EVOTRANSPIRACIÓN POR DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA – PERIODO COMÚN 1988-2018 | 183 |
| TABLA 32. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA – MÉTODO ESTACIONES | |

| | |
|--|-----|
| METEOROLÓGICAS (30 AÑOS)..... | 184 |
| TABLA 33. VALORES DE PRECIPITACIÓN TOTAL Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN Y LOS PROGRAMAS ARCGIS Y EXCEL (20 AÑOS)..... | 190 |
| TABLA 34. CALCULO DE LA EVOTRANSPIRACIÓN POR DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA – PERIODO COMÚN 1998-2018 | 190 |
| TABLA 35. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA – MÉTODO ESTACIONES METEOROLÓGICAS (20 AÑOS) – PROGRAMA EXCEL..... | 191 |
| TABLA 36. VALORES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL OBTENIDOS DE LOS SATÉLITES TRMM_3B43 v7 Y MERRA-2 MODEL M2TMNXFLX V5 Y EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS EN EL PROGRAMA EXCEL – PERIODO COMÚN 1988-2018..... | 198 |
| TABLA 37. CALCULO DE LA EVOTRANSPIRACIÓN POR DATOS DE TELEDETECCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA (20 AÑOS)..... | 199 |
| TABLA 38. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA – MÉTODO TELEDETECCIÓN (20 AÑOS) – PROGRAMA EXCEL. | 199 |
| TABLA 39. DIFERENCIAS REPRESENTATIVAS DE LOS BHC POR EL MÉTODO DE ESTACIONES Y DE TELEDETECCIÓN..... | 207 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | Pág. |
|---|------|
| GRÁFICA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS RÍOS DE ACUERDO CON LA CURVA HIPSOMÉTRICA .. | 127 |
| GRÁFICA 2. CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA..... | 128 |
| GRÁFICA 3. PERFIL LONGITUDINAL DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA. | 135 |
| GRÁFICA 4. PERFIL DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA | 136 |
| GRÁFICA 5. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DE LA CUENCA - PERIODO 1988-2018..... | 150 |
| GRÁFICA 6. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DE LA CUENCA - PERIODO 1998-2018..... | 152 |
| GRÁFICA 7. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DE LA CUENCA – PERIODO 1988- | |

| | |
|--|-----|
| 2018..... | 155 |
| GRÁFICA 8. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DE LA CUENCA – PERIODO 1998-2018..... | 157 |
| GRÁFICA 9. HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA – PERIODO 1988-2018. | 158 |
| GRÁFICA 10. HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA – PERIODO 1998-2018. | 159 |
| GRÁFICA 11. BRILLO SOLAR MENSUAL DE LA CUENCA – PERIODO COMÚN 1998-2018. . | 160 |
| GRÁFICA 12. BRILLO SOLAR MENSUAL DE LA CUENCA – PERIODO COMÚN 1998-2018. . | 160 |
| GRÁFICA 13. EVAPORACIÓN MENSUAL DE LA CUENCA – PERIODO 1988-2018. | 161 |
| GRÁFICA 14. EVAPORACIÓN MENSUAL DE LA CUENCA – PERIODO 1998-2018. | 162 |
| GRÁFICA 15. DISPERSIÓN DE LOS REGISTROS DE PRECIPITACIÓN DEL SATÉLITE TRMM_3B43 v7 DE LA ZONA DE ESTUDIO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA POR SUS COORDENADAS GEOGRÁFICAS..... | 166 |
| GRÁFICA 16. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DE LA CUENCA POR EL MÉTODO DE TELEDETECCIÓN - PERIODO 1998-2018..... | 169 |
| GRÁFICA 17. DISPERSIÓN DE LOS REGISTROS DE TEMPERATURA DEL SATÉLITE MERRA-2 MODEL M2TMNXFLX v5 DE LA ZONA DE ESTUDIO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA POR SUS COORDENADAS GEOGRÁFICAS. | 171 |
| GRÁFICA 18. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DE LA CUENCA POR EL MÉTODO DE TELEDETECCIÓN - PERIODO 1998-2018..... | 173 |
| GRÁFICA 19. COMPARATIVO DE LA PRECIPITACIÓN OBTENIDA POR ESTACIONES METEOROLÓGICAS VS TELEDETECCIÓN PERIODO 1998 - 2018. | 174 |
| GRÁFICA 20. COMPARATIVO DE LA TEMPERATURA OBTENIDA POR ESTACIONES METEOROLÓGICAS VS TELEDETECCIÓN PERIODO 1998 - 2018. | 176 |
| GRÁFICA 21. BALANCE HÍDRICO CUENCA DEL RÍO CHECUA POR MÉTODO TRADICIONAL PERIODO 1988 – 2018 (30 AÑOS) | 184 |
| GRÁFICA 22. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL VS TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL POR MÉTODO TRADICIONAL PERIODO 1988 – 2018 (30 AÑOS)..... | 186 |
| GRÁFICA 23. REPRESENTACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO POR EL MÉTODO DE TRADICIONAL (30 AÑOS) DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA - PROGRAMA INNERSOFT – BALANCE HÍDRICO ISBH v0.9. | 189 |
| GRÁFICA 24. BALANCE HÍDRICO CUENCA DEL RÍO CHECUA POR MÉTODO TRADICIONAL PERIODO 1998 – 2018 (20 AÑOS) | 192 |
| GRÁFICA 25. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL VS TEMPERATURA MEDIA MENSUAL | |

| | |
|---|-----|
| MULTIANUAL POR MÉTODO TRADICIONAL PERIODO 1998 – 2018 (20 AÑOS)..... | 194 |
| GRÁFICA 26. REPRESENTACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO POR EL MÉTODO DE TRADICIONAL (20 AÑOS) DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA - PROGRAMA INNERSOFT – BALANCE HÍDRICO ISBH v0.9..... | 197 |
| GRÁFICA 27. BALANCE HÍDRICO CUENCA DEL RÍO CHECUA POR MÉTODO TELEDETECCIÓN PERIODO 1998 – 2018 (20 AÑOS) | 200 |
| GRÁFICA 28. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL VS TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL POR MÉTODO DE TELEDETECCIÓN PERIODO 1998 – 2018 (20 AÑOS) | 202 |
| GRÁFICA 29. REPRESENTACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO POR EL MÉTODO DE TELEDETECCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA - PROGRAMA INNERSOFT – BALANCE HÍDRICO ISBH v0.9. | 205 |

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la humanidad se ha concientizado y ha reconocido la necesidad imperativa de preservar los recursos hídricos, toda vez que el agua además de ser el elemento más abundante de la tierra es considerada el constituyente principal de todo ser vivo, así mismo, y es una potencia significativa que constantemente está ocasionando cambios en la superficie terrestre. También es un elemento primordial en la climatización de nuestro planeta, para la existencia humana y el progreso de la civilización¹. Así mismo, al reconocer la importancia de este preciado líquido, surge la necesidad de administrarlo de manera adecuada, reconociendo su oferta y demanda en los suelos para las diferentes actividades antropogénicas, razón por la cual se hace necesario contar con fuentes de información confiables y prácticas que permitan tomar las mejores decisiones para satisfacer las futuras demandas reduciendo al máximo los impactos ambientales. De acuerdo con esto, la humanidad ha desarrollado herramientas técnicas (balances hídricos) que permitan establecer las necesidades hídricas de una zona específica y sobre todo la capacidad de estas áreas para almacenar agua en toda su superficie teniendo en cuenta todas las variables dentro de estos procesos naturales.

Actualmente, en Colombia se utilizan los balances hídricos para determinar la cantidad de agua que puede almacenar un suelo y la oferta de este ante la demanda por la construcción de un proyecto o por la necesidad de realizar estudios con fines investigativos y productivos. El insumo de información metrológica en la mayoría de los casos es suministrado por métodos convencionales, los cuales son tomados en la zona establecida para el estudio a desarrollar a través de estaciones meteorológicas, las cuales, en ocasiones presentan un grado de incertidumbre por características del instrumento o condiciones topográficas del área, las cuales pueden generar resultados insuficientes para efectos de pronósticos hidrológicos. Es por esto, que se considera necesario contar con otra metodología (técnica), para el suministro de información climatológica, como es el uso de la teledetección. La cual a 2012 contaba con más de 120 satélites para este uso, así mismo, se ha desarrollado de una manera satisfactoria, en el diseño de aplicaciones de la mayoría

¹ CHOW Ven Te, MAIDMENT David R, MAYS Larry W. Hidrología aplicada. 1 ed. Bogotá. Mc GRAW HILL. 1994.

de las áreas de las ciencias de la tierra², debido a la variabilidad de posibilidades y ventajas que presenta: localización de espacios geográficos, observación de fenómenos temporales e integración de resultados en un Sistema de Información Geográfica – SIG, reduciéndose en muchos casos el tiempo empleado, el grado de incertidumbre de la información y el dinero invertido en los estudios sobre el terreno.³

Adicionalmente, la teledetección al ser una alternativa novedosa y basada en registrar información a distancia a través de sensores remotos, que captan valores de precipitación y temperatura mensuales, se hace necesario conocer si la información que se registra por satélites meteorológicos, presentan una relación con los datos que se miden en las estaciones meteorológicas, razón por la cual este proyecto de investigación, pretende determinar a través del desarrollo de dos balances hídricos con perdidos comunes de 20 años, si el método de teledetección puede ser utilizado como una alternativa adicional en estudios hidrológicos, en los casos en que se presente información de estaciones limitada.

En razón a lo anterior, la presente investigación empleará el balance hídrico propuesto por Thornthwaite y Mather (1957), el cual se basa en un método empírico denominado Método Directo, también conocido como Balances Hídricos Climáticos (BHC), por el hecho de basarse en variables climatológicas para su estimación. Este tipo de balance utiliza la capacidad de almacenamiento de agua del suelo o también conocido como capacidad de campo, como una referencia de la reserva de agua que puede retener en un cierto tipo de suelo y con una cierta cubierta vegetal. Además, el BHC utiliza como datos de entrada valores de precipitación y temperatura de un cierto periodo de años⁴.

² FABREGAT VENTURA, Vicente. Fundamentos teóricos del control de las extracciones mediante teledetección. En: Medida y Evaluación de las extracciones de agua subterránea, (1999). pp. 89-104.

³ BAKER, C., LAWRENCE, R., MONTAGNE, C., PATTEN, D. Mapping wetlands and riparian areas using Landsat ETM+ imagery and decision-tree-based models. En: The Society of Wetland Scientists. Vol. 26 No 2 (Jun 2006); p. 465-474.

⁴ KAR G.; VERMA H. Climatic water balance, probable rainfall, rice crop water requirements and cold periods in AER 12.0 in India. Agricultural Water Management, v. 72, p. 15- 32. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.001>

Aunado a lo anterior, en el presente trabajo se plantea estimar el balance hídrico climático (*BHC*) para la cuenca del Río Checua, ubicada en el Departamento de Cundinamarca, Colombia, con información climatológica proporcionada por estaciones meteorológicas localizadas dentro de la cuenca, e imágenes satelitales proporcionadas por sensores remotos (satélites meteorológicos - teledetección) definidas con la ubicación geográfica de la zona de estudio, utilizando el método directo de Thornthwaite y Mather, con el objetivo de definir a través de la identificación de los periodos húmedos y secos de la cuenca, las diferencias que pueden llegar a generar las variables de entrada (precipitación y temperatura) con las variables de salida (ETP, percolación, déficit y ETR), de acuerdo al método de obtención de registros de información (a distancia), y con ellos, determinar si la información climatológica proporcionada a distancia por un satélite, puede ser de ayuda para los registros captados por las estaciones meteorológicas en campo.

Finalmente, como resultado del presente trabajo se pretender realizar recomendaciones para incentivar el uso de la teledetección como alternativa para el desarrollo de estudios hidrológicos, partiendo que la información de referencia será la captada en la zona por estaciones meteorológicas, las cuales irán orientadas de acuerdo al análisis de resultados de las variables de entra como lo son la precipitación y temperatura, y su grado de incidencia en las variables de salida (evapotranspiración, percolación y déficit).

1. GENERALIDADES

1.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con el argumento en que se desarrollará este trabajo de grado, se puede clasificar y enfocar dentro de la línea de investigación de “Software Inteligente y Convergencia Tecnológica”.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La necesidad desmedida de la humanidad por desarrollar y generar un bienestar económico viene acompañada por el detrimento de los recursos naturales y la pérdida de biodiversidad de nuestro planeta. La constante sed de explorar nuevas alternativas productivas, que cumplan con las necesidades del descontrolado crecimiento demográfico, ha provocado una presión considerable sobre los recursos naturales a nivel mundial. Por esta razón se hace necesario contar con fuentes de información confiables y a la mano que permitan tomar las mejores decisiones para satisfacer las futuras demandas reduciendo al máximo los impactos ambientales.

Conforme con lo mencionado anteriormente, se reconoce el recurso hídrico (agua) como la sustancia esencial que relaciona la mayoría de los procesos químicos biológicos y que se producen en la biosfera, y que generan un impacto directo en el desarrollo socioeconómico. Por tal motivo es de vital importancia contar con las herramientas técnicas que permitan establecer las necesidades hídricas de una zona específica y sobre todo la capacidad de estas áreas para almacenar agua en toda su superficie teniendo en cuenta todas las variables dentro de estos procesos naturales (ciclo hidrológico, capacidad de almacenamiento del suelo, etcétera).

Ahora bien, en Colombia para determinar la cantidad de recurso hídrico disponible de una cuenca (oferta y demanda), se utilizan métodos convencionales en el sitio de estudio, como lo son el uso de estaciones meteorológicas, las cuales proporcionan información hidrometeorológica dependiendo de su tipo y tecnología, factor que es uno de las diferentes limitantes que se pueden considerar al depender únicamente de este método de suministro de información. Adicionalmente, la red de

estaciones está centralizada en su mayoría en las regiones Andina y Atlántica, razón por la cual existen grandes áreas de deficiente cubrimiento meteorológico, ya sea porque las estaciones han sido suspendidas, no se actualizan en su debido tiempo o la zona de estudio no cuenta con una estación meteorológica, razón por la cual se puede determinar que la información puede resultar insuficiente para efectos de pronósticos hidrológicos.

Aunado con lo anterior, surge la necesidad de contar con otro método técnico para obtener la información meteorológica que permita reducir las limitaciones del método convencional (estaciones), siendo una alternativa, el sensoramiento remoto (teledetección), el cual provee información sólida y constante para relacionar con los datos de precipitación medidos por hidrómetros e hidrógrafos. El sensoramiento remoto es, cada vez más, una fuente de datos viable para aplicar a los modelos de hidrología convencional, en especial para zonas poco accesibles.⁵

Finalmente, al contar con dos metodologías para la obtención de variables climatológicas que permitan el desarrollo adecuado de modelos hidrológicos, como el caso de este proyecto del balance hídrico de una zona específica (cuenca del Río Checua), surge la necesidad investigativa de determinar técnicamente cual es la fuente de información meteorológica más confiable, teniendo en cuenta las limitaciones que pueden presentar las estaciones meteorológicas en Colombia y la disponibilidad de información obtenida del uso de la teledetección, con el fin de establecer la importancia de la disponibilidad de recurso hídrico para la naturaleza y las comunidades que hacen uso de este preciado líquido.

1.2.1. Antecedentes del problema

La observación y la medición de datos meteorológicos a través del tiempo se ha convertido en un gran elemento para el desarrollo y crecimiento de un país, teniendo en cuenta, que al extraer información de las variables atmosféricas en tiempo real,

⁵ GAVILÁN, Sebastian. Modelado del Balance Hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico. Argentina, 2019. 3p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería) Pontificia Universidad Nacional de la Plata. Facultad de ciencias agrarias y forestales.

permiten generar alertas meteorológicas y predicciones climáticas o hidrológicas, así mismo, el conocimiento de las variables climáticas contribuyen al desarrollo de estrategias de planeación en proyectos de infraestructura, actividades agropecuarias, etcétera.

De acuerdo con lo anterior, mediante el Artículo 17 de la Ley 99 de 1993 se crea el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), responsable de la operación de estadística de variables meteorológicas, a partir de la obtención, almacenamiento, análisis, estudio, y procesamiento de datos, permitiendo la producción y divulgación de resultados agregados de información básica sobre meteorología.⁶

Para tener un panorama más amplio del inventario con el que cuenta Colombia para el registro de variables climatológicas, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, a través del Informe Consolidado del Área Temática De Clima, identificó que cuenta con dos mil cuarenta y seis (2.046) estaciones en el país, de las cuales (1.857 estaciones) pertenecen al IDEAM, y las restantes ciento ochenta y nueve estaciones (189 estaciones) pertenecen a otras entidades como: Corporaciones Autónomas Regionales, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.S.P (EAAB E.S.P.), la Federación Nacional de Cafeteros, la Central Hidroeléctrica de Caldas S.A., el Fondo de Prevención y Atención de Desastres de Bogotá D.C. (FOPAE)⁷.

No obstante, en la actualidad las técnicas de teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, son usados como una herramienta imprescindible en numerosos ámbitos de investigación, tanto así, que su aplicación es la plataforma para la toma de decisiones en la gestión eficiente de los recursos naturales, la agricultura y la meteorología.

⁶ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Plan de Mejoramiento variables metereológicas - IDEAM. Bogotá. DANE, 2013.

⁷ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Informe técnico final de clima insumos y bases de datos SIG: Levantamiento de inventarios de estaciones meteorológicas en el país, control de calidad de las bases de datos de información climática, análisis de la climatología nacional y generación de productos cartográficos. Bogotá. IDEAM, 2014.

Ahora bien, es de resaltar que desde los años 80 existe un vínculo entre los modelos hidrológicos con la teledetección, cuando se evidenció que existía una relación entre las series temporales de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y la evolución fenológica de las plantas⁸. Desde entonces, se ha venido utilizando información remota para estimar parámetros hidrológicos relacionados con la vegetación en todo tipo de ambientes.⁹

Aunado con lo anterior, los avances tecnológicos referente a la teledetección, brinda la posibilidad de tener una segunda opción de obtener datos meteorológicos, diferentes a los convencionales aportados por los entes gubernamentales o distritales, que en ocasiones no se encuentran en todo el territorio nacional, ya sea porque están suspendidas, no se actualizan en su debido tiempo, o la zona de estudio no cuenta con una estación meteorológica, por lo tanto la teledetección resulta ser una herramienta fundamental para extraer información de las variables atmosféricas y poder realizar pronósticos hidrológicos.

1.2.2. Pregunta de investigación

¿Cuál es la fuente de información meteorológica más confiable a partir de análisis de sensibilidad, para el desarrollo de balances hídricos de zonas específicas, como es el caso de la cuenca del Río Checua?

1.2.3. Variables del problema

De acuerdo con el objetivo a desarrollar en el presente proyecto de grado, se determinan las siguientes variables a estudiar:

- Información climatológica obtenida de las estaciones meteorológicas de la Corporación Regional de Cundinamarca - CAR.

⁸ VAN DE GRIEND, Adriaan A., ENGMAN, Edwin T. (1985). Partial area hydrology and remote sensing. En: Journal of Hydrology. Vol.; 81 No 3-4 (Nov. 1985); p. 211–251.

⁹ PIEDADE, 2010 Citado por GAVILÁN, Sebastian. Modelado del Balance Hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico. Argentina, 2019. 8p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería) Pontificia Universidad Nacional de la Plata. Facultad de ciencias agrarias y forestales

- Información climatológica suministrada por el uso de la teledetección (satélites Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM y MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5).
- Variable climatológica de Precipitación
- Variable climatológica de Temperatura.
- Variable climatológica de Evapotranspiración.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día en Colombia se cuenta con un gran número de estaciones meteorológicas que realizan observaciones y mediciones puntuales de los diferentes parámetros, así mismo, la mayor cantidad de estaciones hidrometeorológicas están centralizada en las regiones Andina y Atlántica, razón por la cual existen grandes áreas de deficiente cubrimiento meteorológico (red densa) y la información meteorológica puede resultar insuficiente para efectos de pronósticos hidrológicos, tal como se evidencia en la Ilustración 1, del presente documento.

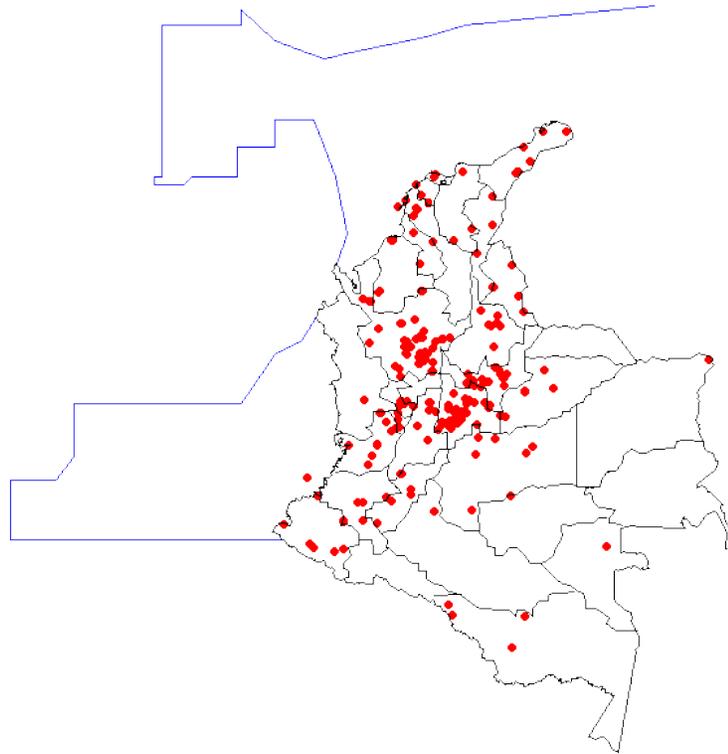


Ilustración 1. Distribución de estaciones climatológicas en Colombia

Fuente: Autores – Información IDEAM.

Ahora, bien, con el empleo de componentes meteorológicos estimados, como lo son las técnicas teledetección o percepción remota, es posible mejorar la predicción y simulación de un sistema hidrológico. Los satélites y su aplicación para la meteorología, es considerado uno de los más grandes aportes, los cuales fueron empleados desde la década del 1960, año en el que comenzó el uso de esta tecnología que, hoy en día, ha manifestado un avance en esta ciencia que reconfirma su importancia en el planeta y la relevancia y relación que existe en la tecnología satelital y la meteorología.

Aunado con lo anterior, surge la necesidad de determinar las fuentes más confiables de la información meteorológica disponible para el desarrollo de balances

hidrológicos de las cuencas del territorio nacional. Esto es de vital interés, toda vez que con estos se toman decisiones para el país en cuanto el uso y disposición de los recursos hídricos.

En este sentido, se busca hacer una comparación a través de un balance hídrico de la cuenca del Río Checua, con datos obtenidos de estaciones meteorológicas y del uso de técnicas de teledetección, con el fin de determinar a través de análisis de sensibilidad, la fuente de información más confiable, para el desarrollo de modelos hidrológicos, para lograr una adecuada administración del uso del recurso hídrico.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un balance hídrico a partir de datos obtenidos de estaciones meteorológicas y de información proporcionada por el uso de la teledetección para la cuenca del Río Checua, y comparar los resultados obtenidos a partir de un análisis de sensibilidad sencillo, tomando como referencia los datos tomados en campo (estaciones).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la información meteorológica obtenida de las siete (7) estaciones seleccionadas (CAR) y de los satélites del servidor GIOVANNI (Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM y MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5) con influencia sobre la cuenca del Río Checua, mediante hojas de cálculo del programa computacional Microsoft Excel.
- Desarrollar el modelo hidrológico de la cuenca de Río Checua, a partir de la información obtenida de estaciones meteorológicas y datos de la teledetección.
- Determinar el balance hídrico superficial de la cuenca del Río Checua, a través del análisis de la variabilidad temporal y espacial de los eventos de precipitación y temperatura.
- Emplear el análisis de sensibilidad sencillo para catalogar cualitativamente la información extraída de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas y del uso de la teledetección, con el fin determinar si los registros climatológicos captados por los sensores remotos, pueden ser considerados confiable para la cuenca del Río Checua, estableciendo como datos de referencia los proporcionados por las estaciones.

3. MARCOS DE REFERENCIA

3.1. MARCO CONCEPTUAL

3.1.1. Hidrología.

La hidrología es considerada la ciencia que brinda una solución a la constante necesidad de vislumbrar el complejo sistema hídrico de la tierra y ayudar a responder los problemas de agua, así mismo, se encarga de realizar el estudio del ciclo del agua y su evolución sobre la superficie de la tierra y bajo el suelo, constituyendo una de sus ramas principales el análisis del volumen hídrico de una región determinada y su distribución en el espacio y el tiempo.¹⁰

Finalmente, la hidrología es la herramienta utilizada para proporcionar métodos que permitan dar solución a dificultades prácticas que se generan en el diseño, la planificación y la operación de estructuras hidráulicas, así como de cualquier proyecto o decisión que se considere el uso de recursos hídricos. Por esta razón es de vital importancia realizar un estudio hidrológico de las zonas donde se tenga pensado modificar las condiciones naturales.

3.1.2. Ciclo Hidrológico.

Varios autores consideran que “el ciclo hidrológico es como un modelo de circulación general que explica el complejo sistema de movimientos y transformaciones del agua dentro de una región. Como toda circulación, no tiene ni inicio ni fin, sin embargo, puede iniciarse una descripción de este desde el momento en que la precipitación desciende”.¹¹

¹⁰ DÍAZ, Lizeth, ALARCON Jairo. Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada NISCOTA para un acueducto interveredal en NUNCHÍA, CASANARE. Bogotá. 2017. 129.p. Trabajo de investigación (trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos). Facultad de ingeniería.

¹¹ LEE, 1980 Citado por GAVILÁN, Sebastian. Modelado del Balance Hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico. Argentina, 2019. 9p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería) Pontificia Universidad Nacional de la Plata. Facultad de ciencias agrarias y forestales.

En relación con lo anterior, la precipitación antes de volver a la atmósfera, es dispersada mediante varios caminos al caer sobre la tierra. Una parte de esta, no logra alcanzar el suelo y es interceptada por superficies vegetativas, las cuales la retienen y disponen para procesos de evaporación directa. La cantidad de lluvia (agua) obstruida por el follaje, depende de las condiciones meteorológicas, las características de las lluvias, la estructura de la vegetación de la zona y las interacciones entre estos factores.¹²

Ahora, la cantidad de agua que ingresa al suelo es considerada infiltración, y depende de las condiciones de humedad de cada zona, de las características de textura y del tipo de cubierta que presente. El agua que no logra infiltrarse en el suelo es denominada escorrentía, la cual escurre por la superficie hasta encontrar canales de drenaje, los cuales se depositan en ríos, lagunas o embalses, contribuyendo a su crecimiento. La porción de aguas lluvias que no genera escorrentía superficial, se percola a través de flujos internos. Las precipitaciones que logran llegar a la superficie (suelo) y se infiltran, alteran la reserva de agua edáfica y son empleadas para la evapotranspiración o se percolan hacia los estratos inferiores del perfil.¹³

¹² HEWLETT, John D., NUTTER, Wade L., An outline of forest hydrology. En: University of Georgia Press. (1969). P. 137.

¹³ ECHEVERRÍA, Cristian., HUBER, Anton, TABERLET, Florent. Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. {En línea}. {12 de abril de 2020} disponible en: (www.scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002007000300013).

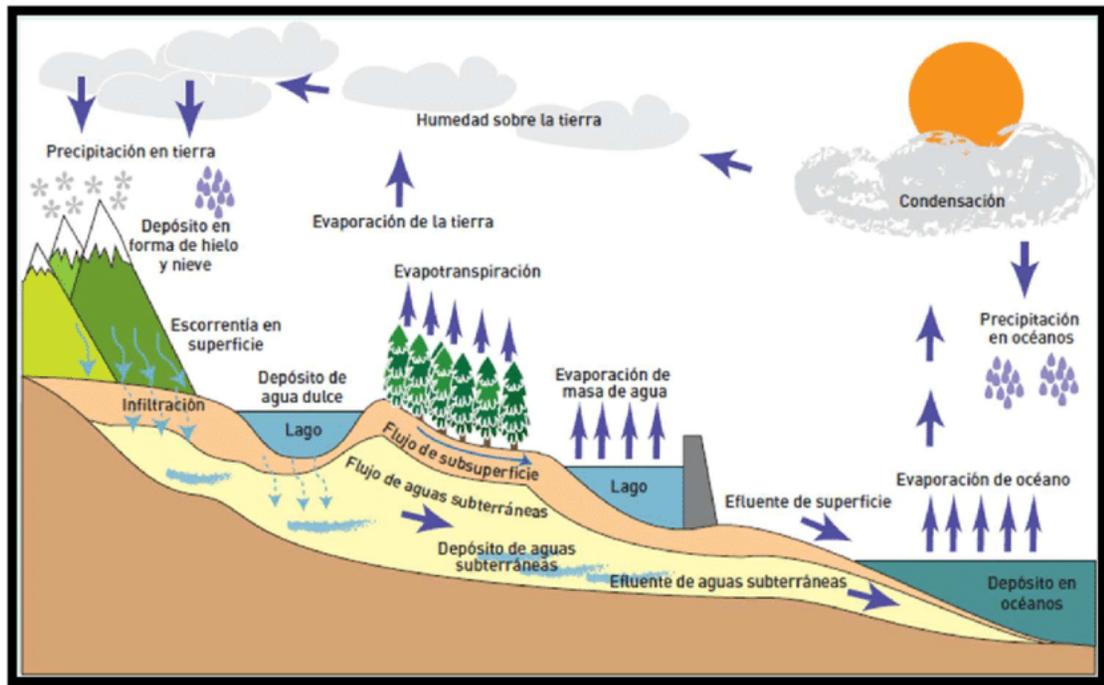


Ilustración 2. Ciclo hidrológico del agua

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ciclo-Hidrologico-del-Agua-Fuente-TUNZA-2010_fig1_326623110.

En relación con la evapotranspiración, se considera como la mezcla de los procesos de evaporación y de transpiración que ocurren en el mismo tiempo en zonas con presencia de vegetación. La evapotranspiración es considerada como uno de los flujos más significativos dentro de los procesos del ciclo hidrológico.

3.1.3. Precipitación.

La precipitación, es bien conocida como una de las variables climatológicas más importantes del planeta tierra, y se genera por los procesos físicos y químicos que suceden en la atmósfera. Técnicamente, es denominada como, el agua originada en la atmósfera y que en forma líquida o sólida se deposita sobre la superficie

terrestre.¹⁴

Para que la precipitación se forme, se requiere que las masas de agua ubicadas en la atmosfera, se eleven de tal manera que se enfríe y se condense parte de su humedad, para que consecutivamente se precipite a la superficie terrestre. Para lograr estas elevaciones de masas de aire, existen los siguientes mecanismos:

- Elevación convectiva: el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva hasta llegar a una altura en que encuentre condiciones favorables para la condensación y la posterior precipitación.
- Elevación orográfica: Una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa.
- Elevación frontal: esta consiste cuando el aire caliente es elevado sobre el aire frío por un pasaje frontal¹⁵

Finalmente, en las zonas localizadas en altitudes ecuatoriales, predomina la precipitación en estado líquido (lluvia) y en zonas diferentes en estado sólido (nieve). La cantidad de agua que cae de la atmósfera es medida en mm/h, considerando que las lluvias de corta duración presentan una mayor intensidad.

3.1.4. Evaporación.

Es un fenómeno físico que permite a un fluido, convertirse en vapor e incorporarse al aire. Así mismo, es clasificada como una variable hidrológica en la cual el agua

¹⁴ ANGULO, Gineth, VELÁSQUEZ Wilmar. Balance hídrico para la finca flores CANELÓN DE GR CHÍA S.A.S., del consumo de agua subterránea en época de estiaje y aguas lluvias en época de invierno, integrado a tuberías presurizadas, canales abiertos y reservorios de almacenamiento. Bogotá. 2017. 83.p. Trabajo de investigación (trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos). Facultad de ingeniería.

¹⁵ VÁZQUES, 2002 citado por JUELA, Oscar. Estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca alta del río Catamayo hasta la estación el arenal en el sitio el boquerón, provincia de Loja. Loja. 2011, 28-31p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería agrícola) Pontificia Universidad Nacional de Loja. Área agropecuaria y de recursos naturales renovables.

pasa de su estado líquido a gaseoso, por el cambio ocurrido cuando parte de sus moléculas, logran suficiente energía cinética para salir de la superficie del agua.¹⁶

Finalmente, esta variable hidrológica puede ser medida con instrumentos meteorológicos como el evaporímetro y lisímetros, su unidad de medición es mm/unidad de tiempo.

3.1.5. Transpiración.

La transpiración o también conocida como evaporación fisiológica, es la consecuencia del proceso biológico y físico, a través del cual, el agua cambia de estado, a causa del metabolismo de la planta y llega a la atmósfera, es decir que las hojas durante el proceso fisiológico de alimentación transportan agua de la raíz a estas, las cuales, realizan la transpiración de los excesos de agua.¹⁷

3.1.6. Evapotranspiración.

Es la variable hidrológica que combinación el proceso de evaporación desde la superficie del suelo y el proceso de la transpiración de la vegetación. Al igual que la evaporación se mide en mm/unidad de tiempo, pero en simultaneidad con la transpiración de la vegetación.¹⁸

El cálculo de la evapotranspiración es primordial para la apreciación de la demanda de riego de un cultivo, el índice de aridez y un porcentaje considerable del balance hídrico y la estimación del escurrimiento medio anual de una cuenca.¹⁹

¹⁶ Ibid., p. 29

¹⁷ Ibid., p. 30

¹⁸ ANGULO, Gineth, VELÁSQUEZ Wilmar. Balance hídrico para la finca flores CANELÓN DE GR CHÍA S.A.S., del consumo de agua subterránea en época de estiaje y aguas lluvias en época de invierno, integrado a tuberías presurizadas, canales abiertos y reservorios de almacenamiento. Bogotá. 2017. 83.p. Trabajo de investigación (trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos). Facultad de ingeniería.

¹⁹ JUELA, Oscar. Op. Cit., p. 30

3.1.7. Evapotranspiración Potencial (ETP).

Es considera como la tasa máxima de evaporación y transpiración presentada en un intervalo de tiempo dado, cuando el suelo cuenta con un cultivo vegetal uniforme de baja altura y sin limitación en el suministro hídrico.²⁰

3.1.8. Evapotranspiración Real (ETR)

Corresponde a la adición de las cantidades de agua transpiradas por las plantas en condiciones atmosféricas, meteorológicas y de cultivo reales existentes en el lugar, y la cantidad de agua evaporada desde la superficie, durante un período de tiempo definido.²¹

3.1.9. Escorrentía.

Técnicamente, es considerar como la cantidad de agua lluvia, que escurre o drena sobre la superficie del suelo. Esta se ocasiona cuando suceden lluvias más frecuentes o intensas, provocando que el agua que llega hasta la superficie se infiltre por un lado, y por otro se sature el suelo.²²

En conclusión, es considera la altura en milímetros de agua de lluvia escurrida y extendida dependiendo la pendiente del terreno.

3.1.10. Infiltración y Percolación.

La infiltración es el proceso por el cual el agua que cae y se deposita en la superficie de la tierra ingresa en el suelo. Es media como la velocidad máxima que tarda en

²⁰ Ibid., p. 31

²¹ ANGULO, Gineth, VELÁSQUEZ Wilmar. Balance hídrico para la finca flores CANELÓN DE GR CHÍA S.A.S., del consumo de agua subterránea en época de estiaje y aguas lluvias en época de invierno, integrado a tuberías presurizadas, canales abiertos y reservorios de almacenamiento. Bogotá. 2017. 83.p. Trabajo de investigación (trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos). Facultad de ingeniería.

²² MONSALVE SÁENZ, German. Hidrología en la ingeniería, Bogotá. Editorial escuela colombiana de ingeniería, 2002. 129p.

penetrar agua a la superficie del suelo. Así mismo, es importante resaltar que del estado del horizonte superficial del suelo depende la infiltración, estas condiciones determinan si las precipitaciones se consideran escorrentía o no.²³

En contraposición, la percolación se define como la capacidad máxima de movimiento de agua a través del suelo hacia niveles inferiores.²⁴

3.1.11. Almacenamiento del suelo.

El almacenamiento de agua del suelo es la cuantía de agua que un suelo reserva en un momento dado; dicha reserva varía entre un valor de cero (suelo seco) y la capacidad de campo, la cual corresponde a la cantidad de agua que queda en el suelo después de que un exceso de agua ha drenado.

3.1.12. Cuenca Hidrográfica.

Comúnmente, se considera la zona delimitada topográficamente que drena mediante una red hidrográfica, es decir, la superficie total de tierras que drenan en un cierto punto de un río o curso de agua.²⁵

Ahora, de acuerdo a varios autores “Una cuenca hidrográfica es el sistema, área o ámbito geográfico, delimitado por la divisoria de aguas, donde ocurre el ciclo hidrológico e interactúan los factores naturales, sociales, económicos, políticos e institucionales y que son variables en el tiempo”.²⁶ La divisoria de aguas, es considerada de manera teórica, como una línea imaginaria que une los puntos de

²³ ANGULO, Gineth, VELÁSQUEZ Wilmar. Op. Cit., p83

²⁴ Ibid., p. 129

²⁵ DÍAZ, Lizeth, ALARCON Jairo. Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada NISCOTA para un acueducto interveredal en NUNCHÍA, CASANARE. Bogotá. 2017. 129.p. Trabajo de investigación (trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos). Facultad de ingeniería.

²⁶ VÁZQUES, 2002 citado por JUELA, Oscar. Estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca alta del río Catamayo hasta la estación el arenal en el sitio el boquerón, provincia de Loja. Loja. 2011, 28-31p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería agrícola) Pontificia Universidad Nacional de Loja. Área agropecuaria y de recursos naturales renovables.

máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes, pero de exposición opuesta; desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de control o emisión. Al interior de las cuencas se pueden delimitar subcuencas o cuencas de orden inferior.

Por otra parte, algunos autores definen la cuenca hidrográfica como “un área contigua que desemboca en un único punto de salida y la precipitación que cae dentro de esta región fluye hacia ese punto”²⁷. Geográficamente la cuenca es la fuente natural de captación y concentración de agua superficial.

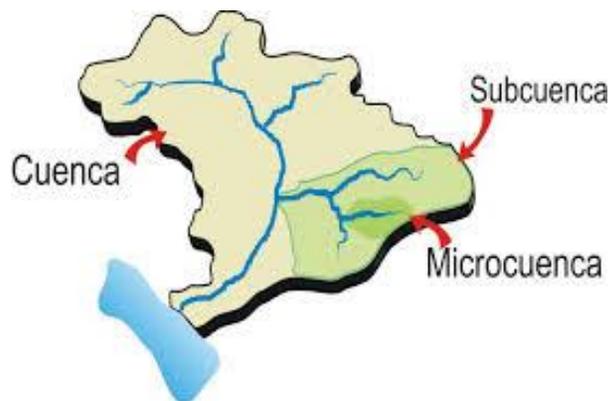


Ilustración 3. Cuenca, subcuenca y microcuenca

Fuente: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf

3.1.13. Corporaciones Autónomas Regionales

Las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, fueron creadas por la Ley, las cuales están integradas por las entidades territoriales de carácter público, las cuales, por sus características geográficas, constituyen una unidad geopolítica, hidrogeográfica o biogeográfica (un mismo ecosistema). Son las encargadas de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y

²⁷ GASPARI, Fernanda Julia, SENISTERA, Gabriela Elba. Valoración de servicios ambientales para el ordenamiento agrohidrológico en cuencas hidrográficas. Primera edición. Buenos Aires. Editorial de la Universidad de La Plata. 2016. 137p.

los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

3.1.14. Estaciones Meteorológicas.

Son consideradas el conjunto de elementos implementados para realizar las observaciones y mediciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos usando instrumentos apropiados.

3.1.15. Estación Pluviométrica (PM).

Es una estación meteorológica que cuenta con un pluviómetro (recipiente) que permite medir la cantidad de lluvia (precipitación) caída entre dos observaciones consecutivas.

3.1.16. Estación Pluviográfica (PG).

Es una estación meteorológica que por su forma mecánica registra de manera continua la caída de lluvia (precipitación), a través de una gráfica que permite conocer la cantidad, intensidad, periodo y duración en que ha ocurrido la lluvia. En la actualidad, se cuenta con pluviógrafos que registran información diaria.

3.1.17. Estación Climatológica Principal (CP).

Estación meteorológica en la cual se registran observaciones de temperatura, nubosidad, precipitación, humedad, viento, radiación solar, brillo solar, evaporación.

3.1.18. Estación Climatológica Ordinaria (CO).

Son estaciones meteorológicas que por sus características cuenta con un pluviógrafo, psicrómetro y pluviómetro, con los cuales se puede observar la humedad relativa.

3.1.19. Estación Sinóptica Principal (SP).

Son estaciones meteorológicas sofisticadas, en las cuales los registros de los datos son tomados horariamente, los cuales están constituidos por precipitación, presión atmosférica, características de humedad, temperaturas extremas, temperatura del aire, tipo y altura de las nubes, visibilidad, nubosidad, dirección y velocidad de los vientos, recorrido del viento, fenómenos especiales, capas significativas de nubes y secuencia de los fenómenos atmosféricos.

3.1.20. Estación Sinóptica Suplementaria (SS).

Son estaciones que realizan observaciones a horas convenidas internacionalmente y los datos corresponden comúnmente a visibilidad, nubosidad, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad del aire y viento.

3.1.21. Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Generalmente, es considerado como un conjunto que mezcla datos geográficos, software y hardware, y los presenta en una representación gráfica (mapas). Específicamente, son sistemas que permiten relacionar cualquier tipo de dato con una localización geográfica, es decir que en una sola representación gráfica (mapa) el sistema genera la distribución de edificios, recursos, poblaciones, entre otros datos de regiones o todo un país.²⁸

Los Sistemas de Información Geográfica – SIG, representan una herramienta muy útil en el procesamiento de datos hidrológicos y climáticos de una cuenca o región.

3.1.22. Teledetección - Percepción Remota.

Algunos autores la definen “como la obtención de información de un objeto sin tener

²⁸ DÍAZ, Lizeth, ALARCON Jairo. Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada NISCOTA para un acueducto interveredal en NUNCHÍA, CASANARE. Bogotá. 2017. 129.p. Trabajo de investigación (trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos). Facultad de ingeniería.

contacto físico con este”²⁹. Para que esto se genere, en la teledetección se utiliza equipos (satélites, radares, etc.) que cuentan con una serie de mecanismos denominados sensores, éstos debido a su posición remota permiten la captura de espectros de radiación que son enviadas por los radares, satélites, entre otros.

Hoy en día, el sensoramiento remoto es considerado como una herramienta utilizada para el relevamiento de suelos, estudios geomorfológicos, hidrológicos, geológicos, urbanismo, recursos forestales, y muchos más, siendo la del interés de esta investigación los del tipo meteorológico.³⁰

3.1.23. Sensores Remotos.

Son dispositivos que permiten captar la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie de la Tierra, usando mediciones del espectro electromagnético para determinar y caracterizar el paisaje, inferir propiedades de éste o medir las variaciones de cuerpos de agua.

3.1.24. Sensores Pasivos.

Son sensores que detectan la radiación natural emitida o reflejada por el área circundante o un objeto. La más observada para este tipo de sensores son la luz solar, a través de imágenes infrarrojas³¹.

Si operación básicamente consiste en captar las radiaciones emitidas por los objetos a partir de la energía solar.

²⁹ CANOBA, 1980 citado por MELGAREJO, José, ROMERO, Luis, OJEDA, Aplicaciones satelitales para la meteorología. En: APOLINAV XXI. Vol.; 5. No 198 (Ene-Dic.2019); p. 8.

³⁰ MELGAREJO, José, ROMERO, Luis, OJEDA, Aplicaciones satelitales para la meteorología. En: APOLINAV XXI. Vol.; 5. No 198 (Ene-Dic.2019); p. 8.

³¹ Ibid., p.9



Ilustración 4. Sensor Pasivo

Fuente:

<https://www.profesaulosuna.com/data/file/TELECOMUNICACIONES/SATELITAL/imagenes.pdf>

3.1.25. Sensores Activos.

La diferencia principal de los sensores activos es que emiten su propia energía a diferencia de los sensores pasivos (RADAR), esto para poder escanear objetos y áreas.³²



Ilustración 5. Sensor Activo

Fuente:

<https://www.profesaulosuna.com/data/file/TELECOMUNICACIONES/SATELITAL/imagenes.pdf>

3.1.26. Reflectancia de las superficies terrestres.

En la teledetección, la reflectancia espectral es una característica principal de las superficies terrestres, esta es considerada como la proporción de energía incidente que es reflejada por una superficie. Razón por la cual, es una magnitud adimensional que puede tomar valores entre 0 y 1 o porcentajes entre 0 y 100%.

³² MELGAREJO, José, ROMERO, Luis, OJEDA, Aplicaciones satelitales para la meteorología. En: APOLINAV XXI. Vol.; 5. No 198 (Ene-Dic.2019); p. 9.

Adicionalmente, el parámetro de la reluctancia de una determinada superficie varía en función de la longitud de onda. Así mismo, la configuración de estas curvas consiente extraer las características espectrales de un área superficial, y tiene un gran impacto sobre la determinación de la región espectral, en la cual los datos de teledetección se deben adquirir para una aplicación particular.

3.1.27. Espectro Electromagnético.

La radiación electromagnética que existe en el universo (natural o artificial), es una forma dinámica de energía generada por la oscilación de una carga eléctrica, que se evidencia únicamente cuando interactúa con la materia.³³

La longitud de onda y la frecuencia son las características principales de la radiación electromagnética. La primera, conocida como la distancia entre dos picos o dos crestas de ondas sucesivas (λ) y la segunda como el número de crestas o ciclos que cruzan por un determinado punto en un segundo (F). Al campo completo de la radiación electromagnética, se le conoce como espectro electromagnético y comprende desde las longitudes más cortas, hasta las más largas.

En la teledetección, se emplean diferentes tipos de bandas electromagnéticas para la generación de imágenes. Son consideradas como energía radiante en función de la longitud de onda y la frecuencia. Estas bandas de longitud de ondas o frecuencias son llamadas espectro magnético.

Los sensores acoplados a bordo de los satélites de teledetección, cuentan con la capacidad de detectar y grabar radiaciones de las regiones no visibles del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas.

³³ FERNÁNDEZ, Felipe. "Introducción a la Fotointerpretación". {En línea} {13 de abril de 2020} disponible en: (<https://www.redalyc.org/pdf/407/40703720.pdf>)

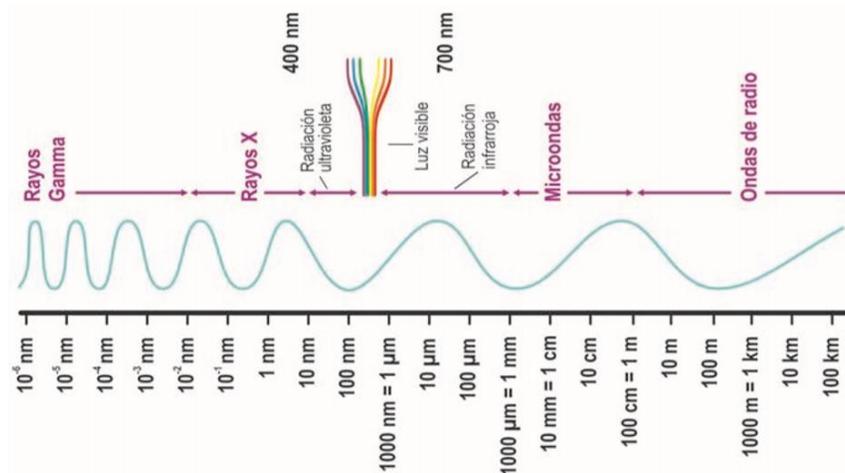


Ilustración 6. Espectro electromagnético.

Fuente:

<https://www.profesaulosuna.com/data/file/TELECOMUNICACIONES/SATELITAL/imagenes.pdf>

Finalmente, la región visible (VIS), infrarroja (IR) y de microondas (MO), son las principales regiones espectrales para la observación de la Tierra desde el espacio.

3.1.28. Imágenes Satelitales.

Las imágenes satelitales de teledetección, son consideradas como un complemento para otros medios de la observación, debido a su cobertura global y periódica de la superficie terrestre, captura de imágenes de la tierra de lugares inaccesibles, la repetitividad de las imágenes que nos permiten analizar fenómenos climáticos a través del tiempo y procesos ambientales que pueden ser entendidos bajo una consideración global. Así mismo, se pueden obtener visiones panorámicas y de alta resolución y a diferentes escalas, entre otras.³⁴

Los satélites de teledetección, cuenta con sensores instalados que tienen una serie

³⁴ RODRIGUEZ CHAVEZ, Oscar, ARREDONDO BAUTISTA, Harold, Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería Civil. Bogotá, 2005. 24p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería civil) Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería.

de particularidades que determinan las características de las imágenes que van a proporcionar, las cuales son definidas por diferentes tipos de resolución.³⁵

- Resolución Espacial.

Dentro de las características de las imágenes captadas por los sensores remotos de la superficie de la tierra, se encuentra la resolución espacial, la cual se considera como una medida de la distancia angular o lineal más pequeña, y viene representada por un píxel. Un píxel es la unidad mínima que conforma una imagen digital.³⁶

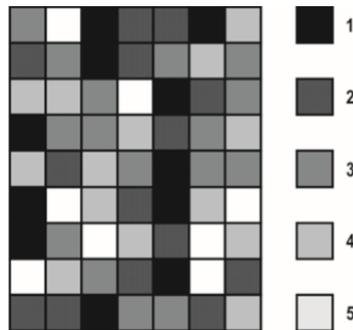


Ilustración 7. Formato de imagen digital (7x9 píxeles).

Fuente: Labrador, Évora y Pérez. 2012.

De acuerdo con la Ilustración 7, cada una de las áreas de la superficie terrestre son representadas por un píxel. Los distintos niveles de energía detectada, son representados en tonos de gris de cada píxel.³⁷

Un píxel es representado generalmente de forma cuadrada, por lo que la longitud medida sobre el terreno de un lado del píxel define la resolución espacial del sensor. La resolución espacial de los sensores se puede expresar en metros o metros/píxel³⁸.

³⁵ LABRADO GARCIA, Mauricio, ÉVORA BRONDO Juan, ARBELO PÉREZ Manuel. Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Canarias. SATELMAC. 2012. 16p

³⁶ MELGAREJO, José, ROMERO, Luis, OJEDA, Aplicaciones satelitales para la meteorología. En: APOLINAV XXI. Vol.; 5. No 198 (Ene-Dic.2019); p. 9.

³⁷ Ibid., p. 10.

³⁸ LABRADO GARCIA, Mauricio, ÉVORA BRONDO Juan, ARBELO PÉREZ Manuel. Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Canarias. SATELMAC. 2012. 17p

- Resolución Espectral.

Otra de las características de las imágenes captadas de la superficie terrestre por los sensores remotos, es el número de anchura de las bandas espectrales que el sensor es capaz de medir, conocido como la resolución espectral. Estos sensores son considerados más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que, con estas se facilita la caracterización de distintas cubiertas.³⁹

Al aumentar el número de canales o bandas espectrales, incrementará la resolución espectral de la imagen captada, no obstante, esta resolución adicional supone también un costo en términos de volumen de datos e incremento del costo de procesamiento.⁴⁰

- Resolución Radiométrica.

Es definida como como la cuantía mínima de energía necesaria para aumentar el valor de un píxel en un nivel digital (ND).

Adicionalmente, se considera la extensión radiométrica, como el intervalo dinámico, o máximo número de niveles digitales, que pueden ser detectados por un sensor particular.

- Resolución Temporal.

Esta resolución, depende considerablemente de las características orbitales del satélite que capta la imagen de la superficie terrestre, razón por la cual se define como el ciclo de repetición, o intervalo de tiempo, entre dos capturas de imágenes sucesivas de una misma porción de la superficie.

3.1.29. Imágenes de teledetección

³⁹ MELGAREJO, José, ROMERO, Luis, OJEDA, Aplicaciones satelitales para la meteorología. En: APOLINAV XXI. Vol.; 5. No 198 (Ene-Dic.2019); p.11.

⁴⁰ LABRADO GARCIA, Mauricio, ÉVORA BRONDO Juan, ARBELO PÉREZ Manuel. Op. Cit., p. 17

Los satélites de teledetección suministran imágenes digital tipo raster (ver Ilustración 7), en la cuales a cada pixel se le asigna uno o varios niveles digitales a través de valores numéricos, los cuales hacen referencia a la energía media, recibida dentro de una determinada banda espectral. Aunado con lo anterior, se pueden adquirir los siguientes tipos de imágenes:⁴¹

- Imagen multiespectral (MS).

Este tipo de imágenes se caracterizan por tener asociado varios niveles digitales (valores numéricos) a cada pixel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. Estas imágenes son consideradas como uno de los productos más útiles, ya contiene una firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Así mismo, la capacidad de análisis de los elementos presentes en estas, dependerá del número de bandas que proporcione el sensor.⁴²

- Imagen pancromática (PAN).

Estas imágenes son comúnmente conocidas por representar imágenes con una escala de grises (blanco y negro), se caracterizan por contar con una sola banda espectral, la cual considera frecuentemente gran parte del espectro infrarrojo (visible y comienzo). Son empleadas para la detección de elementos de menor tamaño (pequeños) de la superficie terrestre, los cuales no podrían ser distinguidos en una imagen multiespectral. Así mismo, la imagen tipo PAN presentan ventajas por contar con una mayor resolución espacial que la multiespectrales.⁴³

- Imagen fusionada (PS).

Las pan-sharpened (PS), por su denominación en inglés, son generadas a partir de fusionar dos tipos de imágenes, una multiespectral y una pancromática. Estas imágenes se caracterizan por asignar a cada pixel de la imagen PAN valores originarios de un algoritmo que combina la imagen pancromática con la

⁴¹ Ibid., p. 21

⁴² Ibid., p. 21

⁴³ Ibid., p. 21

multiespectral. Como resultado final se obtiene una imagen multiespectral, con la resolución espacial de la pancromática.

Este tipo de imágenes no son utilizadas para análisis espectrales, toda vez que se modifica la información espectral original captada por los sensores a través de los algoritmos usados, razón por la cual son empleadas únicamente como herramientas de interpretación visual.⁴⁴

- Imagen estéreo.

Las imágenes estéreo suelen ser utilizadas para generar modelos de elevación del terreno, ya que estas contienen dos imágenes de una misma área tomadas con distintos ángulos de visión, esto se debe a que gran parte de los satélites, presentan la capacidad de reorientar su sensor, lo que permite captar, en una o en sucesivas pasadas, este tipo de imágenes,

3.1.30. Análisis de Sensibilidad

Los análisis de sensibilidad, tiene como fin determinar los parámetros de entrada que más influyen en la variabilidad de la salida, a través de un estudio cuantitativo o cualitativo de las relaciones que existen entre la información que entra y sale de un modelo. Este tipo de análisis es utilizado para acrecentar la confianza en el modelo y para investigar su robustez.⁴⁵

Existen tres métodos para desarrollar un análisis de sensibilidad, los cuales se agrupan en tres clases:

- Los métodos de selección: Se caracterizan por emplear pocas herramientas computacionales, son utilizados para identificar un conjunto de parámetros que afectan la salida. Estos tienen como desventaja que únicamente proporcionan una medida cualitativa y no cuantitativa.

⁴⁴ Ibid., p. 21

⁴⁵ SALTELLI, Andrea, TARANTOLA, Stefano, CAMPOLONGO, Francesca, RATTO, Marco. Sensitivity analysis in practice. United Kingdom. John Wiley & Sons Ltd., 2004. 63p.

- Los métodos locales de análisis de sensibilidad: Se caracterizan porque todos los parámetros varían dentro de un rango de incertidumbre muy pequeño, así mismo, se enfocan en un impacto netamente local de los parámetros de entrada. En este método es considerado “one a time” o caso particular OAT, toda vez que, es un procedimiento donde se varía solamente un parámetro al tiempo y los otros se mantienen constantes.
- El análisis de sensibilidad global: Este método todos los parámetros de entrada son variados al mismo tiempo, dentro de rangos de incertidumbre diferentes, determinando de manera cuantitativa los parámetros de entrada que más afectan el desempeño del modelo.⁴⁶

3.2. MARCO TEÓRICO

3.2.1. Balance Hídrico.

Es considerado como una instrumento que permite determinar las características de una cuenca a través de la aplicación del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad.⁴⁷

Entradas = Salidas + Cambio en el almacenamiento

$$P = ES + ETR + I \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde,

P = Precipitación.

ES = Escorrentía Superficial.

ETR = Evapotranspiración

⁴⁶ BERTRAND, Loos. LEMAÎTRE, Paul. A review on global sensitivity analysis methods. {En línea}. {12 de abril de 2020} disponible en: (<https://arxiv.org/pdf/1404.2405.pdf>).

⁴⁷ DÍAZ, Lizeth, ALARCON Jairo. Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada NISCOTA para un acueducto interveredal en NUNCHÍA, CASANARE. Bogotá. 2017. 129.p. Trabajo de investigación (trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos). Facultad de ingeniería.

I = Infiltración.

El balance hídrico de una cuenca es fundamental para el conocimiento del afluente y su capacidad de abastecimiento a las poblaciones aledañas que se verán beneficiadas con el recurso. Desde el punto de vista teórico, el análisis de este, permitirá realizar juicios para el uso del afluente principal y alcanzar un uso más racional de los recursos de agua en el espacio y en el tiempo, con la construcción de obras de captación para posterior distribución. El balance hídrico brindará información acerca de la capacidad del río y los meses del año en el cual el afluente aumenta su caudal o por el contrario lo disminuye como también pondrá permitir realizar predicciones hidrológicas, basado en datos que son registrados por las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.⁴⁸

Por otro lado, el método para el cálculo de los componentes requiere datos de precipitación y caudales, los cuales aportan entidades como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM y las Corporaciones Ambientales Regionales – CARs.

Finalmente, existen varios modelos para estimar el balance de agua en el suelo; para el caso de este proyecto se empleará el método directo propuesto por Thornthwaite y Matter en 1957, según el cual se va perdiendo agua para poder generar la evapotranspiración potencial hasta agotar la reserva.

3.2.2. Método directo o Balances Hídricos Climáticos (BHC)

Este método de balance hídrico fue propuesto por Thornthwaite y Mather en 1957, el cual se basa en un método empírico denominado Método Directo o Balances Hídricos Climáticos (BHC), por el hecho de basarse en variables climatológicas para su estimación.⁴⁹

⁴⁸ Ibid., p. 129

⁴⁹ GUTIERREZ, Eduardo. Vázquez, Gustavo. SÁNCHEZ, José. DÍAZ, Torres. Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México. {En línea}. {10 de abril de 2020} disponible en: (file:///C:/Users/Cristian/Downloads/Santillanetal_2013_BalanceHidrologicoVarClimCuencaCazonesVerMex.pdf).

Con este método, partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración potencial mensual (ETP), se puede estudiar el balance del agua en el suelo de un punto determinado.⁵⁰

En este tipo de balance se utiliza la capacidad de almacenamiento de agua del suelo o también conocido como capacidad de campo, como una referencia de la reserva de agua que puede retener en un cierto tipo de suelo y con una cierta cubierta vegetal. Además, el BHC utiliza como datos de entrada valores de precipitación y temperatura de un cierto periodo de años (por lo menos 30 años).⁵¹

Este método de balance hídrico (BHC) ha sido utilizado en diversos trabajos, donde, en la mayoría de los casos, ha servido como un medio para examinar los principales componentes del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración y escurrimiento), y la forma en que estos alimentan y controlan el comportamiento de los caudales de la red de drenaje.⁵²

3.2.2.1. Procedimiento para el desarrollo del método directo o Balances Hídricos Climáticos (BHC).

- **Evolución de la reserva de agua en el suelo**

El balance hídrico consiste en definir mes a mes los siguientes parámetros (en mm):

Precipitación media mensual (P):

La serie de precipitación media mensual para la zona de estudio.

P : precipitación media mensual

⁵⁰ UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Balance Hídrico Prácticas. {En línea}. {12 de abril de 2020} disponible en: (http://titulaciongeografia-sevilla.es/contenidos/profesores/materiales/archivos/2018-10-29BH_Practicas.pdf).

⁵¹ KAR G.; VERMA H. Climatic water balance, probable rainfall, rice crop water requirements and cold periods in AER 12.0 in India. Agricultural Water Management, v. 72, p. 15- 32. 2005. {En línea}. {12 de abril de 2020} disponible en: (<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.001>).

⁵² DINGMAN, S. L. Physical hydrology. 2nd Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 646 p.

Evapotranspiración potencial (ETP):

Determinar el comportamiento de la evapotranspiración potencial o la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación que se desarrolla en óptimas condiciones.

ETP : evapotranspiración potencial o de referencia

Escorrentía mensual:

Con una estación de caudal y su área de drenaje aferente debe determinarse la escorrentía media mensual (este puede ser despreciada).

Diferencia entre Precipitación (P), Evapotranspiración (ETP) y Escorrentía (E)

Es el balance mensual de entradas y salidas potenciales de agua del suelo.

Esta diferencia clasifica los meses en secos ($P - ETP - E < 0$) y en húmedos ($P - ETP - E > 0$).

$P - ET$: diferencia entre la P y la ET

Ecuación (2)

Es el balance mensual de entradas y salidas de agua del suelo. La diferencia nos clasifica los meses en secos ($P-ET<0$) y en húmedos ($P-ET>0$) según las entradas superen o no a las salidas.

Almacenamiento del suelo (R)

El almacenamiento o reserva de agua del suelo es la cantidad de agua que un suelo contiene en un momento dado, dicha reserva varía entre un valor de cero (suelo seco) y la capacidad de campo, la cual corresponde a la cantidad de agua que queda en el suelo después de que un exceso de agua ha drenado.

R : reserva

Capacidad máxima de almacenamiento

La capacidad de almacenamiento de agua del suelo se estima según el tipo de suelo y la profundidad de las raíces de la cobertura vegetal (pastizales).

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo se expresa como la capacidad de almacenamiento disponible total (Alm), teniendo en cuenta solamente el agua que se dispone para la cobertura vegetal comprendida entre el contenido de humedad correspondiente a la capacidad de campo C_c y el correspondiente al punto de marchitez permanente Pmp.

$$Alm = \left(\frac{C_c - Pmp}{100} \right) \times D_a \times D_{ef} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Dónde:

Alm = Almacenamiento máximo de agua en el suelo en mm

Cc = Humedad del suelo a capacidad de campo en % de volumen

Pmp = Humedad del suelo a punto de marchitez permanente en % de volumen

Da = Densidad aparente (adimensional)

Def = Profundidad efectiva de las raíces en mm

Almacenamiento en el balance hídrico (Ri)

En el cálculo del balance hídrico, el almacenamiento del mes "i" (en función de la del mes anterior "i-1") será:

$$R_i = R_{i-1} + (P_i - ETP_i - E_i) \quad \text{si} \quad 0 < R_{i-1} + (P_i - ETP_i - E_i) < CC$$

$$R_i = CC \quad \text{si} \quad R_{i-1} + (P_i - ETP_i - E_i) > CC$$

$$R_i = 0 \quad \text{si} \quad 0 > R_{i-1} + (P_i - ETP_i - E_i)$$

Infiltración o Percolación (I)

Cuando el suelo está totalmente saturado o a capacidad de campo y existe un aporte adicional del balance de $P - ETP - ESC$ se genera la infiltración o percolación. Por tanto:

$$I = R_{i-1} - R_i + (P_i - ETP_i - E_i) \quad \text{si } R_{i-1} - R_i + (P_i - ETP_i - E_i) > 0$$

$$I = 0 \quad \text{si } R_{i-1} - R_i + (P_i - ETP_i - E_i) \leq 0$$

Utilización de almacenamiento (UA)

Si el suelo se encuentra totalmente saturado o a capacidad de campo y en los meses siguientes se presenta un balance negativo de $P - ETP - ESC$ se utiliza el almacenamiento hasta agotarlo.

$$UA_i = 0 \quad \text{si } (P_i - ETP_i - E_i) > 0$$

$$UA_i = |(P_i - ETP_i - E_i)| \quad \text{si } (P_i - ETP_i - E_i) < 0$$

Déficit de agua (D)

Es el volumen de agua que falta para cubrir las necesidades potenciales de agua (Evapotranspiración). Por tanto, el déficit de agua es:

$$D_i = 0 \quad \text{si } (P_i - ETP_i - E_i) > 0$$

$$D_i = |(P_i - ETP_i - E_i)| - UA_i \quad \text{si } (P_i - ETP_i - E_i) < 0$$

Evapotranspiración Real (ETR)

La ETR es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes, dependiendo de que haya suficiente agua disponible para evaporar y así llegar a la ETP o de referencia o no, por tanto, la ETP_i es siempre mayor o igual que la ETR_i . Por lo tanto:

$$ETR_i = ETP_i - D_i \quad \text{Ecuación (4)}$$

Finalmente, para verificar el cierre del balance se debe comparar los siguiente:

$$ENTRADAS = SALIDAS \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$PRECIPITACIÓN = ESCORRENTIA + INFILTRACIÓN + ETR \quad \text{Ecuación (6)}$$

Del balance BHC también se puede estimar el porcentaje de recarga al acuífero:

$$\frac{\text{Precipitación}}{\text{Percolación}} \quad \text{Ecuación (7)}$$

| PARÁMETRO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ANUAL |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| PRECIPITACIÓN | | | | | | | | | | | | | |
| ETP | | | | | | | | | | | | | |
| ESCORRENTIA | | | | | | | | | | | | | |
| P-ETP-ESC | | | | | | | | | | | | | |
| ALMACENAMIENTO | | | | | | | | | | | | | |
| PERCOLACION (mm) | | | | | | | | | | | | | |
| UTILIZACION | | | | | | | | | | | | | |
| ALMACENAMIENTO | | | | | | | | | | | | | |
| DEFICIT | | | | | | | | | | | | | |
| ETR | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 1. Formato para la estimación del balance hídrico climático

Fuente: Unidad de Ciencias de la Atmósfera - Evapotranspiración y balance hídrico. 2008

3.2.3. Métodos de Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)

Para el cálculo de la ETP existen diferentes fórmulas y métodos que se han desarrollado por diversos investigadores como Turc, Pennam, Hargreaves, Chistiansen, Blaney y Criddle entre otros, o como Thornthwaite que será el método utilizado para el cálculo de la evapotranspiración potencial en este proyecto.⁵³

⁵³ ALLEY, William, M., On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. Water Resources Research. Volume 20. 1984, p. 1137.

3.2.3.1. Método de Thornthwaite

El método de Thornthwaite fue desarrollado en el año 1948, en este se derivó una fórmula en la cual se correlaciona diferentes datos de evapotranspiración potencial con datos de temperatura media mensual y el tiempo estipulado en la duración de un día. Normalmente, para este método, se considera que un día experimenta una insolación diaria de doce (12) horas y un mes de treinta días (30), por lo cual se establece la siguiente ecuación:⁵⁴

$$ETP_i = \left(\frac{10 \times T_i}{I}\right)^a \times 0,53 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde,

$ETP_i =$ Evapotranspiración potencial del mes i , en cm

$T_i =$ Temperatura del mes i , en $^{\circ}C$

$I =$ Índice de calor

$$a = 0,675 \times 10^{-6} * I^{-3} - 0,771 \times 10^{-4} * I^{-2} + 1,792 \times 10^{-2} * I + 0,49239 \quad \text{Ecuación (9)}$$

El índice de calor es el resultado de la sumatoria de los índices de calor que mensualmente se registran, $I = \sum_{j=1}^{12} J_i$, donde J_i representa el índice térmico mensual, $J_i = \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1,514}$.

Una vez se tengan los valores de los resultados se debe realizar un ajuste en relación con la duración del día y mes en estudio. Después de esto se deben multiplicar los valores de un factor de E_i por un factor de corrección el cual depende de la latitud y el mes.

⁵⁴ Ibid., p. 45-47.

3.2.4. Monitoreo Ambiental desde Satélites.

Inicialmente el termino de teledetección, se refería a las fotografías captadas a través de aeronaves, las cuales eran consideradas el único sensor existente. Actualmente, en el marco del estudio del referido termino, este se asocia a la observación remota de la superficie terrestre⁵⁵.

Conforme con lo anterior, se han desarrollado instrumentos para la observación de la tierra desde el espacio con la intención de monitorear procesos ambientales de gran impacto social y económico.

En conclusión, un sistema de teledetección espacial incluye los siguientes elementos⁵⁶:

- Los sensores remotos cuentan con un foco de emisión que puede estar de forma externa al mismo, cuya función es ser considerado la fuente de energía, en la cual se origina la radiación electromagnética que detecta el satélite, esta emisión de energía puede ser pasiva (externar al sensor) o activa (emitido por el sensor)
- La superficie de la tierra, la cual está cubierta o formada por diferentes masas de vegetación, aguas, suelos o construcciones antropogénicas, las cuales captan la señal de energía emitida de la fuente y la reflejan de acuerdo a sus características físicas.
- Dentro de los elementos de los satélites, se cuenta con sistema que tiene como función captar la energía emitida por las cubiertas terrestres,

⁵⁵ SOBRINO, 2001 Citado por GAVILÁN, Sebastian. Modelado del Balance Hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico. Argentina, 2019. 3p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería) Pontificia Universidad Nacional de la Plata. Facultad de ciencias agrarias y forestales.

⁵⁶ CHUVIECO, Emilio, SALAS, Javier, MEZA, Enrique, VARGAS, Franklin. Empleo de la teledetección en el análisis de la deforestación tropical: el caso de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela) {En línea} {15 de abril de 2020} disponible en: (www.researchgate.net/publication/28098824_Empleo_de_la_teledeteccion_en_el_analisis_de_la_deforestacion_tropical_el_caso_de_la_reserva_forestal_de_Ticoporo_Venezuela).

codificarlas, gravarlas y enviarlas de forma directa a los sistemas de recepción, esta componente es definido como sistema sensor y la plataforma que lo alberga.

- Lo sensores remotos cuenta con un sistema de recepción y comercialización, los cuales son los encargados de recibir la información que se transmite por la plataforma, grabarlas en formatos apropiados, corregirlas y distribuirlas a los interesados.
- Personal encargado de interpretar la información captada por los sensores remotos, así mismo estas, son los encargados convertir los datos (raster) en información temática de interés, esta puede ser digital o visual, con el fin de facilitar la evaluación del problema en estudio.
- Persona (usuario final) a la cual va dirigida la información fruto de la interpretación realizada, encargada de analizar y dictaminar sobre las consecuencias que de él deriven.

Una de las grandes ventajas de los satélites, la cual comparadas con otras fuentes de información y que lo hacen único, es su capacidad de ofrecer una gran cobertura temporal y espacial, ya que esto es de vital utilidad al momento de realizar monitoreo de fenómenos de impactos considerables a la sociedad, la economía y el ambiente⁵⁷.

Aunado con lo anterior, los flujos de información generados por la teledetección paulatinamente comenzaron a ser más utilizados en ramas de la ciencia, donde gran parte de información es proveída por datos de campo. Con la popularización de las imágenes satelitales de alta resolución y su disponibilidad en servidores de dominio público, ha permitido albergar un rango de usuarios que utiliza estas tecnologías, logrando la aceleración de procesos y disminuyendo el costo de investigación.⁵⁸

⁵⁷ Ibid.

⁵⁸ MACEDO FILHO, Gregorio. Imágenes de satélite y teledetección como herramienta de apoyo para el desarrollo de minas de yeso y escombreras en el araripe. {En línea} {13 de abril de 2020} disponible en:

Los sistemas de teledetección en su mayoría graban las imágenes captadas en formatos digitales, permitiendo que estas sean transmitidas en tiempo real a las estaciones terrestre.⁵⁹ En la práctica solo los satélites meteorológicos ofrecen información en tiempo real a los usuarios finales, los demás sensores requieren de una etapa previa de calibración de los datos.

3.2.5. Fundamentos Físicos de la Teledetección.

En cualquier sistema de teledetección deben existir los siguientes elementos: sensor, objeto y flujo energético. Este último, es el responsable de la interacción entre los objetos, este mismo puede ser emitido ya sea por el objeto, el sensor u otra fuente externa como el sol, estas son las tres formas de adquirir información mediante los sensores remotos: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión.⁶⁰

En cualquiera de los casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor remoto constituye una forma de radiación electromagnética, este fenómeno de radiación es el que principalmente interactúa en los procesos de teledetección. Científicamente este fenómeno se ha descrito desde dos teorías contrapuestas una, determinada como un haz ondulatorio, y la otra concebida como una sucesión de unidades discretas de energía (fotones o cuantos), con masa igual a cero, se podría decir actualmente que las dos teorías se complementan gracias a que la luz se comporta de acuerdo con ambos planteamientos.⁶¹

https://www.researchgate.net/publication/310050050_IMAGENES_DE_SATELITE_Y_TELEDETECCION_COMO_HERRAMIENTA_DE_APOYO_PARA_EL_DESARROLLO_DE_MINAS_DE_YESO_Y_ESCOMBRERAS_EN_EL_ARARIPE.

⁵⁹ TRENCH, Mariana. El derecho espacial y la cooperación internacional ante los desastres naturales. {En línea} {13 de abril de 2020} disponible en: (www.researchgate.net/publication/340819025_EL_DERECHO_ESPACIAL_Y_LA_COOPERACION_INTERNACIONAL_ANTE_LOS_DESASTRES_NATURALES)

⁶⁰ RODRIGUEZ CHAVEZ, Oscar, ARREDONDO BAUTISTA, Harold, Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería Civil. Bogotá, 2005. 30p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería civil) Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería.

⁶¹ RODRIGUEZ CHAVEZ, Oscar, ARREDONDO BAUTISTA, Harold, Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería Civil. Bogotá, 2005. 31p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería

La radiación que detecta los sensores remotos (satélites meteorológicos), proviene de tres fuentes naturales principales: el sol, la tierra y la atmósfera. La radiación electromagnética incidente de origen solar es afectada por la atmósfera a través de los procesos de transmisión, absorción, "scattering" o difusión, y reflexión.

A su vez el sistema tierra-atmósfera constituye otro foco radiactivo. La Figura 1 muestra los diferentes procesos, de forma simplificada, que se pueden dar en el sistema tierra- atmósfera y el balance energético asociados a los distintos focos emisores de energía, así como a los procesos que básicamente tienen lugar en la atmósfera.⁶²

Los sensores de satélites miden la energía radiante proveniente de las distintas fuentes emisoras que ha sufrido una serie de procesos en el sistema tierra-atmósfera. Las principales fuentes de emisión son la superficie de la tierra las nubes, la propia atmósfera y las zonas acuosas (mares, océanos, lagos, ríos, etc.).

civil) Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería.

⁶² Ibid., p,32

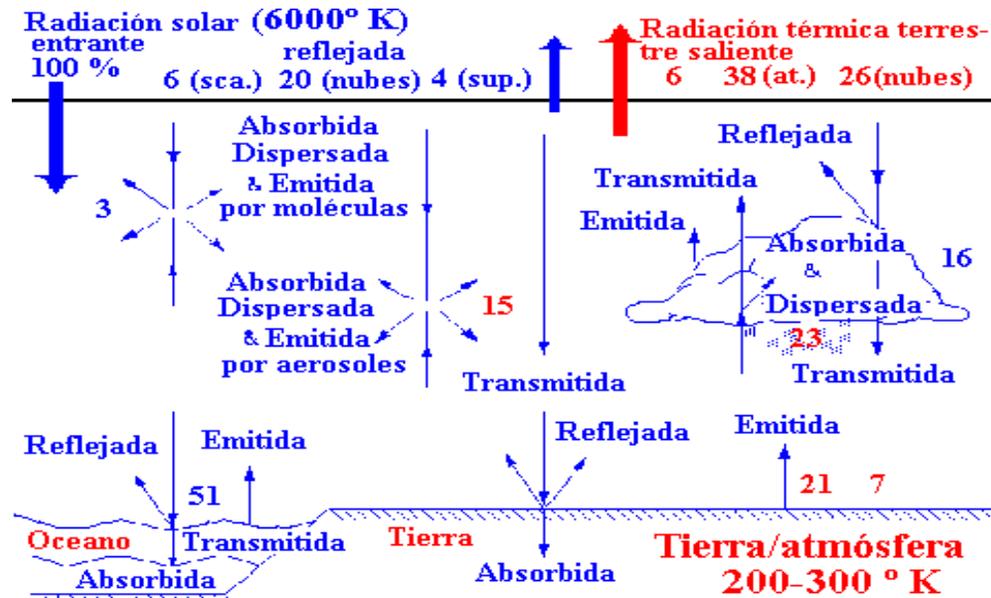


Figura 1. Comportamiento de la Radiación Electromagnética en la tierra.

Fuente: <http://www.sensoresremotos.com>

3.2.6. Interacción Tierra-Radiación

Cuando la energía de la radiación entra en contacto con la superficie terrestre, esta presenta 4 diferentes comportamientos:

- Parte será reflejada con ángulo similar al de incidencia.
- Parte será reflejada uniformemente hacia todas las direcciones.
- Parte será absorbida por el objeto y se calentará, luego esta será reflejada en la banda térmica hasta que se enfríe.
- Parte es transmitida a otros objetos o a la superficie de la tierra sin ser reflejada hacia el sensor.

La radiación que la superficie terrestre recibe puede descomponerse en:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t$$

Ecuación (13)

De esta ecuación simplificada al dividir por ϕ_i resulta:

$$1 = \rho + \alpha + \tau$$

Ecuación (14)

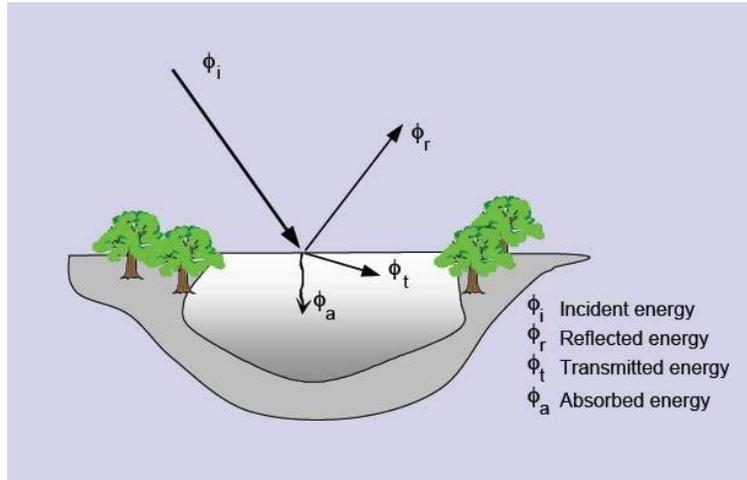


Figura 2. Interacción Radiación-Suelo.

Fuente: Earth Science Enterprise.

En conclusión, la suma de la absorción, reflectividad y transmisividad debe ser igual a 1, y cada una de ellas depende de las características de la superficie en estudio.

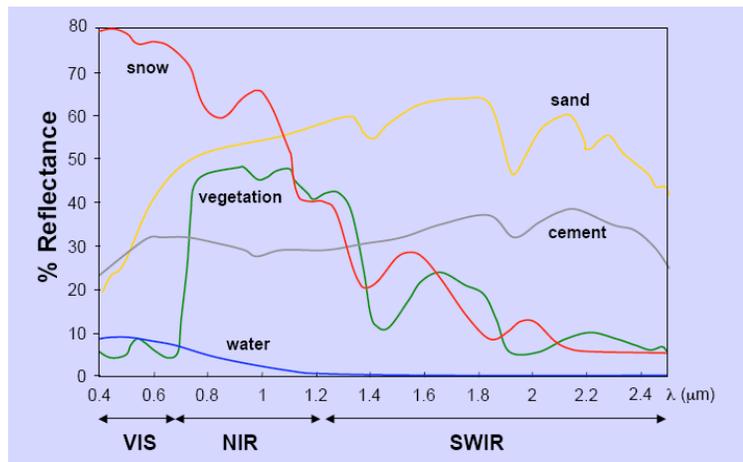


Figura 3. Curva de Reflectividad.

Fuente: Earth Science Enterprise.

Es importante resaltar que el flujo de energía recibido por el sensor depende también de las condiciones atmosféricas, el emplazamiento ambiental de la cubierta y la geometría de la observación. Este último factor, permite que la energía llega al sensor según el ángulo con el que la superficie refleje la energía incidente, esto se encuentra ligado con la rugosidad presentada por la superficie. Así se distinguen dos tipos de superficies, aquellas que reflejan con el mismo ángulo de haz incidente (especulares), y aquellas que reflejan uniformemente en todas las direcciones lambertianas.⁶³

3.2.7. Interacción Atmosfera-Radiación

La radiación solar, es aproximadamente igual a la que emitiría un cuerpo negro a una temperatura de 6000 °K (curva negra en la Figura 5). El máximo de radiación se encuentra entre 0.2 y 4 micras y el máximo absoluto en 0.5 micras. De acuerdo con el espectro electromagnético el total de la energía se distribuye de la siguiente

⁶³ RODRIGUEZ CHAVEZ, Oscar, ARREDONDO BAUTISTA, Harold, Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería Civil. Bogotá, 2005. 44p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería civil) Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería.

forma: el 43% radiación visible, el 49% infrarrojo cercano, el 7% al ultravioleta y el 1% restante se reparte entre rayos X, rayos Gamma y ondas de radio.⁶⁴

La radiación solar se origina en la fotosfera, sin embargo, antes de salir del sol tiene que atravesar otras dos capas: la cromosfera y la corona. Los gases en estas capas absorben parte de esta radiación y la reemiten de acuerdo con la temperatura que tienen (curva roja en la Figura 5). Después de dejar la atmósfera solar la energía viaja 150 millones de km hasta la Tierra. Debido a que el ángulo sólido sustentado por el sol con respecto a la Tierra es muy pequeño se considera que la radiación solar incide sobre la cima de la atmósfera en la misma dirección.⁶⁵

Antes de alcanzar la superficie terrestre la radiación solar tiene que atravesar la atmósfera donde sufrirá procesos de reflexión, dispersión y absorción alcanzando el suelo alrededor de un 50% (línea azul de la Figura 5) de la energía inicial. Aproximadamente el 25% llega como radiación directa y el otro 25% como radiación difusa. Se entiende por radiación difusa aquella que ha sufrido procesos de dispersión en la atmósfera. Depende, en general, del tamaño de las moléculas de los gases y de las partículas de polvo en suspensión.⁶⁶

Aproximadamente un 30% de la radiación solar que llega al sistema tierra-atmósfera es devuelta de nuevo al espacio, sin cambio en la longitud de onda (se incluye en este apartado la energía dispersada hacia el espacio). La fracción de energía reflejada con respecto a la incidente se denomina albedo. Se suele expresar en porcentaje y varía dependiendo de la cantidad de nubes, de las partículas suspendidas en el aire, del ángulo que forman los rayos al incidir sobre la superficie y de la naturaleza de ésta. Las nubes son las que mejor reflejan la radiación solar, mientras que las superficies de agua son las menos adecuadas; sin embargo, se presentan casos de que el sol se encuentra cercano al horizonte, la reflexión del agua puede aumentar considerablemente.

⁶⁴ RODRIGUEZ CHAVEZ, Oscar, ARREDONDO BAUTISTA, Harold, Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería Civil. Bogotá, 2005. 45p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería civil) Pontifica Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería.

⁶⁵ Ibid., p.45

⁶⁶ Ibid., p.45

Alrededor del 20% de la radiación solar es absorbida en la atmósfera. Los gases atmosféricos son absorbentes selectivos, es decir, se comportan de diferente forma dependiendo de la longitud de onda de la radiación incidente. En la Figura 4, se observan las bandas de absorción de los principales gases atmosféricos. El nitrógeno es un pobre absorbente de la radiación solar, mientras que el oxígeno, el ozono y el vapor de agua sí son absorbentes eficientes. La suma de las contribuciones de estos tres gases prácticamente completa el 20% de absorción de la radiación solar en la atmósfera.⁶⁷

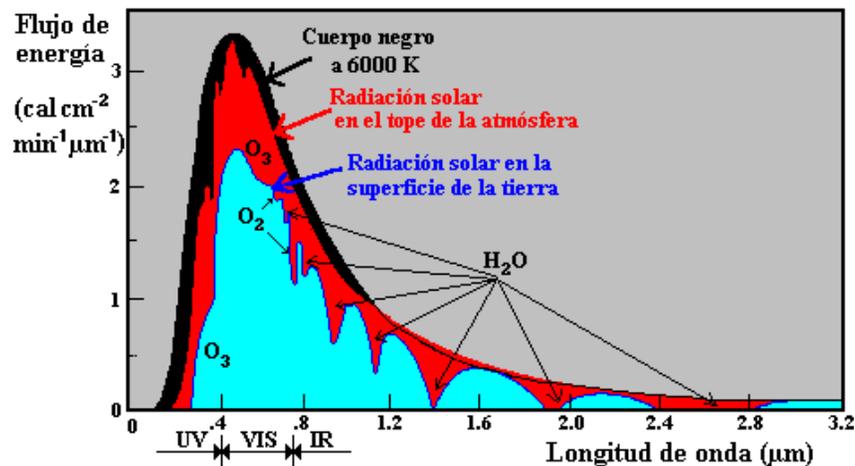


Figura 4. Distribución espectral de la radiación solar

Fuente: <http://www.lydeplanck.com.mx>

3.2.8. Comportamiento Tierra-atmósfera frente a la Radiación Electromagnética.

Los procesos radiativos de más interés para el caso de la radiación solar son la reflexión, dispersión y absorción. Para el caso de la radiación terrestre, los

⁶⁷ RODRIGUEZ CHAVEZ, Oscar, ARREDONDO BAUTISTA, Harold, Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería Civil. Bogotá, 2005. 45p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería civil) Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería.

fenómenos más importantes son la emisión y la absorción de los distintos tipos de materiales, líquidos y sólidos, que constituyen la superficie de la Tierra y los constituyentes de la atmósfera: polvo, nubes, gases, aerosoles, etc.

Mientras que en general es una buena aproximación considerar a los líquidos y sólidos como cuerpos negros, absorbiendo toda la radiación que les llega y emitiendo de acuerdo con su temperatura (ley de Planck), para los gases no se puede hacer esta aproximación. La absorción y la emisión de los gases dependen fuertemente de la longitud de onda.

En la Figura 5, se evidencia cómo la radiación terrestre escapa fácilmente de la tropósfera hacia el espacio exterior (entre 8 y 11 μm), debido a que ni el vapor de agua ni el dióxido de carbono, entre otros gases, tienen bandas de absorción en esa zona. Este intervalo del espectro se denomina ventana atmosférica.⁶⁸

Hay que observar también la existencia de otra ventana atmosférica, en la zona visible del espectro que afectaría por lo tanto a la radiación solar, entre 0.3 y 0,7 μm , aproximadamente. Estas dos ventanas atmosféricas son aprovechadas por los satélites para obtener las imágenes IR y VIS respectivamente.⁶⁹

Por otro lado, entre 5 y 8 μm existe una fuerte banda de absorción del vapor de agua, que no existe en el resto de los componentes atmosféricos, esta banda es la que se aprovechará para las imágenes de vapor de agua (WV).⁷⁰

⁶⁸ RODRIGUEZ CHAVEZ, Oscar, ARREDONDO BAUTISTA, Harold, Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería Civil. Bogotá, 2005. 48p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería civil) Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería.

⁶⁹ Ibid., p.48

⁷⁰ Ibid., p.48

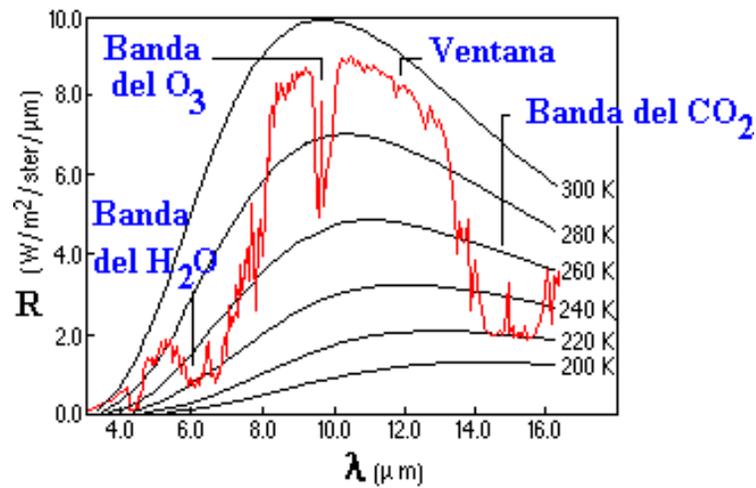


Figura 5. Radiación terrestre (Superficie + Atmosfera).

Fuente: <http://www.fao.org>

Ahora bien, en la Figura 6 se trata de representar los coeficientes de absorción de los diferentes gases atmosféricos para un rango de longitudes de onda.

En el eje vertical disponemos de los coeficientes de absorción a través de una atmósfera estándar en la vertical. Un valor próximo a uno indicará que la radiación que llega al sensor del satélite es nula o casi nula. El caso opuesto lo constituyen las ventanas atmosféricas que dejan escapar cualquier información de una superficie radiante.

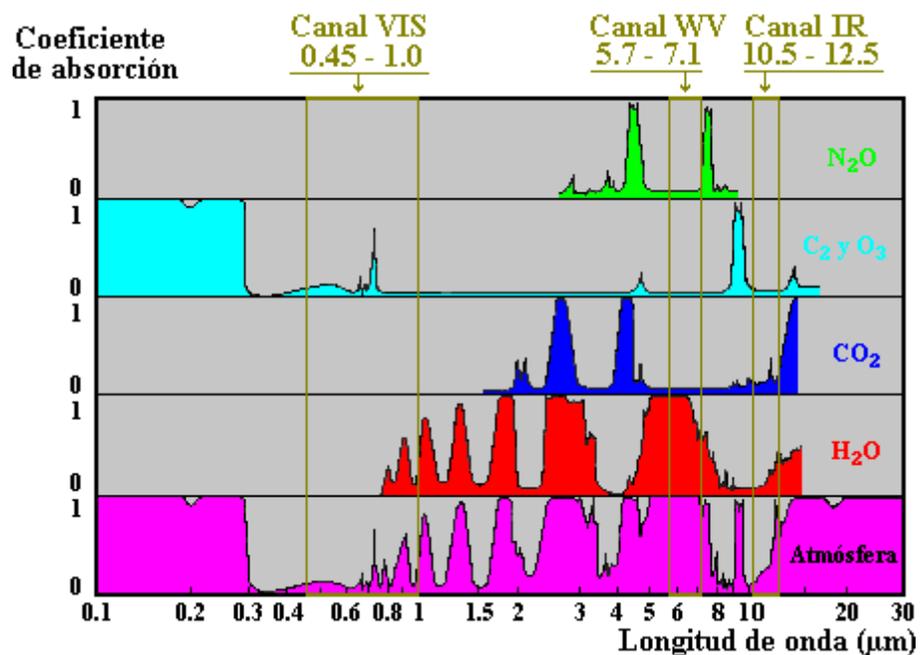


Figura 6. Absorción de gases atmosféricos.

Fuente: <http://www.ondaselectromagneticas.com>

3.3. MARCO GEOGRÁFICO

3.3.1. Ubicación Geográfica, Jurisdicción Administrativa y Posición Geográfica.

El área de estudio (Cuenca del Río Checua) está ubicada en el Departamento de Cundinamarca, a una distancia de 50 kilómetros al norte de la Sabana de Bogotá y sobre el altiplano de esta. Está localizada al final de un valle circundado por serranías semejando una herradura que se abre hacia el sur. Esta cuenca hidrográfica cuenta con una extensión de territorio de 17.500 hectáreas aproximadamente, que une a los municipios de Nemocón, Cogua, Tausa, Cucunubá y Suesca.⁷¹

⁷¹ CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Cuenca hidrográfica del río

De acuerdo con la extensión territorial de la cuenca del Río Checua está distribuida a lo largo de cinco (5) municipios de la siguiente manera:

| Municipio | % de área total |
|------------------|------------------------|
| Nemocón | 48.6 |
| Tausa | 18.3 |
| Cocunubá | 11.9 |
| Cogua | 11.4 |
| Suesca | 9.8 |
| TOTAL | 100 |

Tabla 2. Jurisdicción administrativa Cuenca del Río Checua.

Fuente: Autores

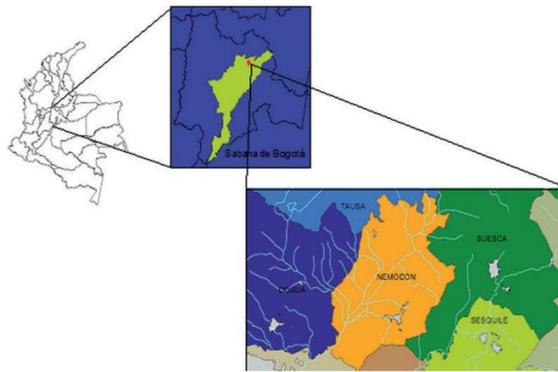


Figura 7. Jurisdicción administrativa Cuenca del Río Checua.

Fuente: Distribución Geográfica de especies prioritarias para la conservación - Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis

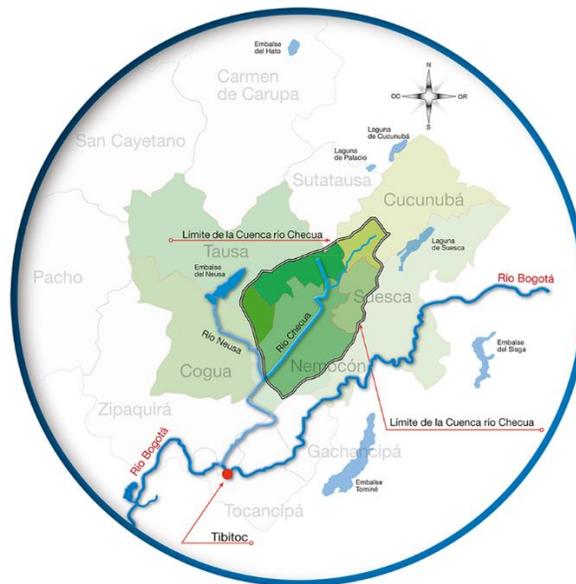


Figura 8. Limitación de la Cuenca del Río Checua
Fuente: Maljacu 2016.

Finalmente, la cuenca del río Checua se localiza en las siguientes coordenadas geográficas:

| COORDENADAS GEOGRÁFICAS | | |
|------------------------------|--------|---------------|
| Extremo Meridional | 5°4' | Latitud Norte |
| Extremo Septentrional | 5°13' | Latitud Norte |
| Extremo Occidental | 73°56' | Latitud Oeste |
| Extremo Oriental | 73°47' | Latitud Oeste |

Tabla 3. Posición Astronómica de la Cuenca del Río Checua.
Fuente: Autores

3.3.2. Hidrografía

El Río Checua es considerado un afluente del Río Neusa, el cual desemboca, a su vez, en la margen derecha del Río Bogotá, entre Zipaquirá y Nemocón. Esta cuenca hace parte de la zona alta del Río Bogotá

Aunado a lo anterior, el río Checua reúne las aguas que discurren de las partes altas de los cerros de Cucunubá, en la vereda alto de Aire, a 3.100 m.s.n.m y que inicialmente vierten sus aguas en la quebrada Barrancas la cual sirve de lindero con la vereda del mismo nombre en el Municipio de Suesca. Desde allí el río Checua inicia un camino recibiendo el primer aporte a su cauce de las quebradas Hoyo Hondo, Quebrada seca, Quebrada Alto Pelado, Blanca y el Salitre⁷².

Desde el Municipio de Tausa en las veredas Ladera Grande, Rasgatá alto y bajo, Pajarito y Chorrillo corren las quebradas Pajarito, Honda, El Altillo, el Chorrillo y el río Tiguaneque para hacer su aporte hídrico al río Checua⁷³.

En el Municipio de Cogua, desde los cerros el Tunjo en la vereda Patasica y la Cuchilla, La Leonera, en la vereda Casa Blanca, hacen su aporte a la cuenca las quebradas El Cajón, San Roque y El Pedregal.

En el Municipio de Nemocón desde los cerros orientales en las veredas de Susatá, Moguá, Perico y Astorga bajan las aguas de las quebradas Las Huertas y Hoyo hondo.

Todas las aguas abrazan la región para dar vida a la Cuenca del río Checua, Así mismo, el afluente del Río Checua pertenece a la zona hidrográfica del río Magdalena, y cuenta con la siguiente unidad hidrográfica:

| Área Hidrográfica | Zona Hidrográfica | Subzona Hidrográfica | Cuenca hidrográfica | Unidad hidrográfica nivel II |
|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------------------------------|
| Magdalena Cauca | Medio Magdalena | Río Bogotá | Río Checua | Quebrada El Abuelo |
| | | | | Quebrada La Toma |
| | | | | Quebrada Pedregal |
| | | | | Río Checua |
| | | | | Río Neusa |
| | | | Río Checua | Quebrada Bolívar o |

⁷² CORPORACIÓN AUTONOMA DE CUNDINAMARCA. Aptitud de uso de los suelos en el área CAR. Capítulo de suelos. Bogotá, CAR. 1998. P. 20.

⁷³ Ibid., p. 20.

| Área Hidrográfica | Zona Hidrográfica | Subzona Hidrográfica | Cuenca hidrográfica | Unidad hidrográfica nivel II |
|-------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---|
| | | | Parte Baja | Chismes |
| | | | | Quebrada San Antonio o del Padre Ciervo |
| | | | | Río Neusa |
| | | | | Río Susagua |

Tabla 4. Unidad hidrográfica del Río Checua

Fuente: Base Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS, 2008.

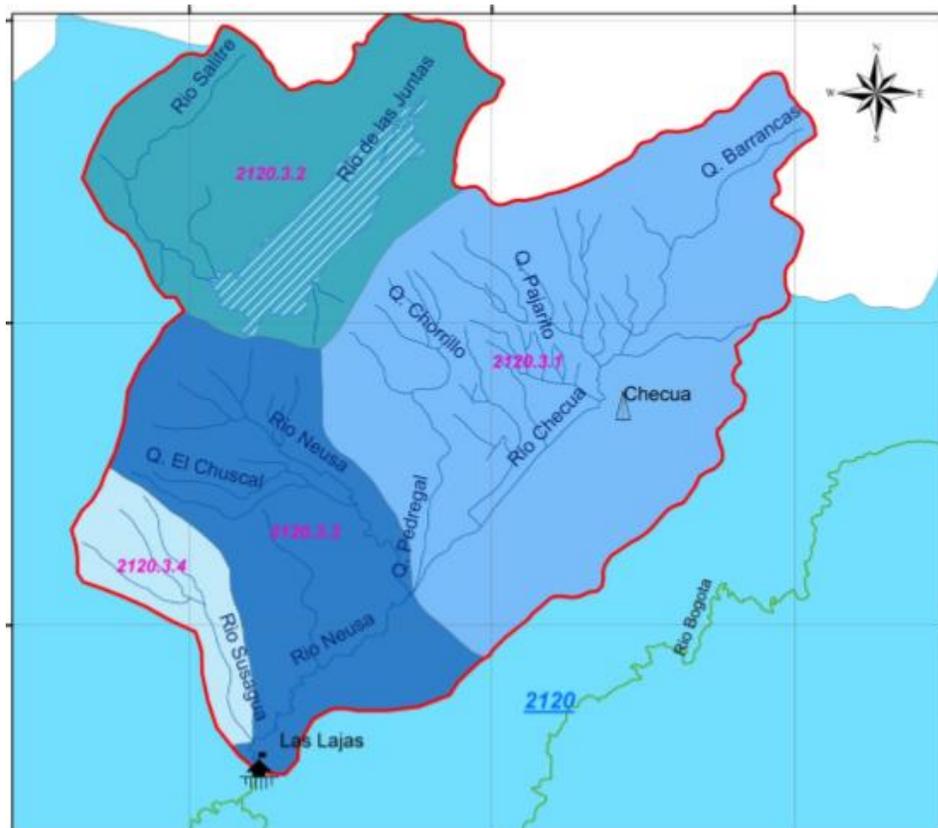


Figura 9. Red hidrográfica de los municipios de Nemocón, Cogua, Tausa, Cucunubá y Suesca

Fuente: Base Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS, 2008.

3.3.3. Fisiografía

El valle del río Checua se encuentra ubicado en la parte alta de la Cordillera Oriental en una depresión típica del Valle Andino, con una longitud aproximada de 24 km., y una anchura en su parte media de unos 15 km.⁷⁴

El relieve presenta las pendientes más fuertes (80 - 100 %) en las áreas aledañas a las divisorias de vertientes y van haciéndose suaves a medida que se acercan al centro del valle, por donde transcurre el cauce principal de drenaje en una forma encajonada. La depresión central es interrumpida por una serranía localizada a lo largo de la cuenca, la cual está controlando en su mayor parte el curso del río Checua y que en algunas partes alcanza diferencias de elevación de hasta 150 m.⁷⁵

- **Cuenca Alta**

Se caracteriza por la presencia de una serie de ondulaciones y depresiones con una red de drenaje bastante densa. Esta manifestación del relieve obedece a la alternancia de materiales blandos y resistentes que favorecen la acción deferencial de la red de drenaje en el modelado de la vertiente. En la parte central se observa un afloramiento de material resistente, que orienta la dirección del río. La vertiente oeste es un monoclinial de moderada pendiente, donde el material sedimentario ha desarrollado suelos residuales en materia orgánica, en la parte alta, y acumulación de depósitos de talud en la parte baja. Estos últimos depósitos en la actualidad se encuentran bastante erosionados, aflorando en muchos casos la roca madre. La vertiente este presenta inclinaciones más fuertes dependiendo esencialmente de su estructura interna y en ella es más notable y crítica la abundancia de materiales arcillosos erosionados, ya que gran cantidad de suelos y depósitos han sido transportados y arrastrados por la escorrentía, quedando frecuentemente al descubierto la roca totalmente desnuda. La parte alta de la cuenca tiene una superficie aproximada de 73 km² y un perímetro de 42 km⁷⁶.

⁷⁴ CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Estudio de Desarrollo y Manejo Integral de la Cuenca del Río Checua, tomo IA. Bogotá, 1980.

⁷⁵ Ibid., p. 11.

⁷⁶ CORPORACIÓN AUTONOMA DE CUNDINAMARCA. Aptitud de uso de los suelos en el área

- **Cuenca Baja Cuenca Baja**

Se presenta un gran depósito de acumulación de materiales fluvio-lacustres, es una zona bastante plana que cubre la parte axial del sinclinal del Checua, considerado morfológicamente como una gran artesa estructural. El río ha sido controlado por una serie de jarillones, lo cual ha permitido la utilización de las tierras con fines agropecuarios. La parte inferior posee una superficie aproximada de 91,6 km² y un perímetro de 46 Km.

3.3.4. Geología General del Río Checua.

La cuenca del Río Checua, está caracterizada por procesos erosivos de gran intensidad sobre materiales blandos constituidos predominantemente por arcillolitas y areniscas de origen terciario, que componen las formaciones Guadalupe, Guaduas, Bogotá y Cacho principalmente, en el sector central de la Sabana de Bogotá, cerca de la población de Nemocón.⁷⁷

Adicionalmente, de acuerdo con la síntesis del capítulo de geología del “Estudio de Desarrollo y Manejo Integral del Río Checua”, presentado por Ortiz Arango & CIA LTDA a la CAR en 1980, podemos determinar las siguientes características:

La cuenca del Río Checua, en general, está constituida por roca sedimentaria de edades terciarias y cretáceas, cubiertas en gran parte por depósitos cuaternarios recientes; las rocas sedimentarias están representadas por las formaciones Bogotá, Cacho, Guaduas y Guadalupe. La zona presenta un comportamiento de alta susceptibilidad a la erosión debido a la naturaleza blanda de éstas formaciones, fácilmente atacables por las aguas superficiales, que circulaban sin mayor control durante los periodos de lluvia. Los fenómenos erosivos son favorecidos por la carencia de una vegetación protectora y por la delgada capa de suelos desarrollados que desaparece fácilmente hasta dejar el material parental desnudo, donde se entallan los drenajes superficiales, formando profundas y extensas zanjas

CAR. Capítulo de suelos. Bogotá, CAR. 1998. P. 25.

⁷⁷ CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Estudio de Desarrollo y Manejo Integral de la Cuenca del Río Checua, tomo IA. Bogotá, 1980.

que finalmente resultan en paisajes “Bad Lands”.

- Depósitos Cuaternarios de Checua (Qflg):

Es un depósito de origen fluvioacustre, y posiblemente fluvioglacial, que ocupa la mayor parte de las zonas bajas, planas tipo sabana, donde el río había formado una serie de meandros y en la actualidad rellenos por materiales aluviales, una vez canalizado.

- Depósitos Aluviales (Qa):

Conforman la mayor parte de los depósitos presentes a la salida de los ríos y afluentes hacia la parte plana, y en los cauces de algunos afluentes de las partes altas, éstos depósitos están constituidos generalmente por una mezcla heterogénea de arenas gruesas a finas y algunos fragmentos de areniscas.

- Depósitos De Derrubio (Qd):

Se encuentran localizados sobre los taludes de las vertientes especialmente en el pie del monte de la franja este. En la zona baja del río Checua, están constituidos esencialmente por arenas y limos, cubiertos en algunas partes por grandes bloques de areniscas.

- Formación Bogotá:

Consta en general de lodolitas, arcillolitas y limolitas rojizas y verdosas, débilmente estratificadas. Esta formación se encuentra afectada fuertemente por erosión.

- Formación Cacho:

Está constituida en general por un paquete de areniscas cuarzosas de grano grueso ligeramente conglomerática, friables, con presencia de estratificación cruzada, en capas de 1 a 2 metros de espesor. Las capas de areniscas de grano grueso comúnmente están intercaladas por arcillolitas grises que se erosionan muy fácilmente.

- Formación Guaduas: Esta región está constituida por cinco (5) niveles.
 1. Primer nivel (TKg1): Constituido por lutitas arcillolitas y limotitas grises y negras con intercalaciones alternantes de limotitas y areniscas delgadas
 2. Segundo nivel (TKg2): Compuestos por areniscas lutitas grises, limotitas y mantos de carbón.
 3. Tercer nivel (TKg3): Constituido por limotitas, lutitas, lodolitas y mantos de carbón. Algunas veces se presentan areniscas delgadas.
 4. Cuarto nivel (TKg4): Consiste en areniscas de grano fino a medio poco consolidadas y con marcas de oleaje, y lutitas grises que alteran con facilidad.
 5. Quinto nivel (TKg5): Consta principalmente de arcillas grises y rojas y pequeños lentes de areniscas.
- Formación Guadalupe Superior (Kgs): Constituida en general por areniscas cuarcíticas, de grano medio hasta grueso, ligeramente conglomeráticas y coloraciones amarillentas y blancas, algunas capas son bastante friables y con estratificación masiva.

3.3.5. Suelos

Goza de suelos agrícolas de mediana profundidad, suelos negros semejantes a los de páramo, pero sujetos a manejos tradicionales que predicen su destino, un destino ya conocido, la erosión y la esterilidad. En el subsuelo se encuentra un gran volumen de reservas de carbón. Esta franja conserva algunos relictos de bosque de diversidad y porte más exuberante, allí nacen las principales quebradas que alimentan el río Checua, es posible encontrar algunos encenillos con 8 y 10 metros⁷⁸.

⁷⁸ GIRALDO, M y ALCÁZAR CAICEDO, C. "Modelo de distribución potencial de *condalia thomasiana* (Rhamnaceae), especie endémica del valle del río Checua, Sabana de Bogotá, Colombia" {En línea}. p. 141.

Es el área de la cuenca que en épocas de lluvias logra almacenar y regular el líquido de manera más eficiente.

3.3.5.1. Área Plana De La Cuenca Del Río Checua

De acuerdo con el estudio de suelos realizado por el IGAC⁷⁹, es de carácter semidetallado, en el cual las unidades de suelos son amplias a nivel de asociación de conjuntos, prestando especial atención a la separación cartográfica de los diversos grados y clases de erosión.

Asociación Río Bogotá- Checua- La Cabaña (BC):

Los suelos de esta asociación se localizan en la parte plana del río Checua. Ocupan mayor extensión los suelos del conjunto Río Bogotá, seguido del conjunto Checua y por último la Cabaña.

- Conjunto Río Bogotá: Los suelos de este conjunto generalmente se encuentran formando fajas estrechas a lo largo del río Checua y sus afluentes; la mayor parte de éstos suelos se encuentran sujetas a inundaciones periódicas, en aquellos lugares donde no existen obras para su defensa.

Ocupa pendientes de 0 a 1%; la topografía es plana, el drenaje externo es muy lento (encharcable), al igual que el interno, mientras que el natural es muy pobremente drenado. Estos suelos pueden mejorarse para cultivos mediante el control de las inundaciones y drenajes adecuados. La fertilidad natural de estos suelos se califica como moderada.

- Conjunto Checua: Los suelos de éste conjunto se encuentran localizados principalmente a lo largo de las márgenes del Río Checua y bordeando las estivaciones de la vertiente del mismo río. El material parental de los suelos de este conjunto son el producto de la erosión en la parte media de la cuenca.

⁷⁹ MOLINA H., CRUZ Burgos R., LIBARDO A., PROAÑO Carlos, CHAVEZ Gloria. Estudio General de Suelos de las Provincias de Ubaté y Norte de la Sabana de Bogotá. IGAC. 1.982.

- Conjunto La Cabaña: Los suelos de este conjunto ocupan posiciones bajas dentro del paisaje de la planicie aluvial. Se presentan en topografía plana con pendientes de 0 - 1%; son suelos muy pobremente drenados. El primer horizonte es de textura franco arcillosa orgánico; de color negro, sobre un horizonte franco de color negro, que a su vez descansa sobre un material vegetal parcialmente descompuesto y permanentemente saturado de agua. La fertilidad natural se considera como moderada.

3.3.5.2. Área de Vertiente de la Cuenca del Río Checua

Suelo de depósitos de derrubios, sobre arcillolitas:⁸⁰

- Consociación Bojaca (BO): Esta consociación se encuentra integrada casi exclusivamente por el conjunto Bojaca, pero pueden encontrarse inclusiones del conjunto Cabrera en sus límites más altos y del conjunto Coluvios pero en áreas muy pequeñas.
- Conjunto Bojacá: Los suelos de este conjunto son muy susceptibles a la erosión, encontrándose todos los grados en todas las pendientes. El relieve donde se encuentran es muy complejo, con pendientes desde 3 a 50% y en algunos casos mayores del 50%. La topografía puede ser ondulada y quebrada.

Debajo del primer horizonte se encuentra una capa arcillosa muy dura, de más o menos 30 cm. de espesor, con presencia de manchas ferruginosas. Este horizonte es tan denso y compacto que lo hace impermeable a las raíces de las plantas.

El material parental de éstos suelos está constituido por arcillas sedimentarias terciarias. El horizonte superficial puede ser proveniente de las partes altas de la cordillera, debido a cambios climáticos que determinaron la formación de un horizonte orgánico que posteriormente fue sepultado por el manto coluvial.

⁸⁰ CORPORACIÓN AUTONOMA DE CUNDINAMARCA. Aptitud de uso de los suelos en el área CAR. Capítulo de suelos. Bogotá, CAR. 1998. P. 22.

El material subyacente a este conjunto es principalmente de arcillolitas blandas y de gran susceptibilidad a la erosión. La fertilidad natural de éstos suelos es baja.

Asociación Coluvios - Bojacá (CL): Esta asociación se encuentra formada por el complejo de suelos Coluvios y el conjunto Bojacá. El primero es muy variable y corresponde a áreas de relieve moderadamente inclinado, con pendientes pronunciadas.

El perfil en algunos lugares puede ser muy profundo y en otros, presenta piedra de diferentes tamaños en la superficie y/o dentro del perfil.

- Complejo Coluvios: Estos suelos se caracterizan por su gran variabilidad, en cuanto a la disposición de sus horizontes, profundidad efectiva y pedregosidad. Puede presentar un epipedón ócrico o úmbrico y horizonte cámbrico. Los colores superficiales son pardos grisáceos oscuros, sobre pardos amarillentos.

Suelos sobre Arcillolitas y Areniscas:

- Asociación Cabrera-Monserrate (CA): Esta asociación generalmente se encuentra inmediatamente a continuación en la asociación Bojacá, en las partes más altas de la cuenca del río Checua. El conjunto Cabrera es el que ocupa la mayor extensión, conteniendo pequeñas inclusiones del conjunto Monserrate.
- Conjunto Cabrera: Los suelos de este conjunto se caracterizan por presentar un epipedón úmbrico que varía de espesor en espesor y en contenido de carbono alcanzando profundidades de hasta 1.50 y 2.00 m. La textura superficial generalmente es franca. En algunos lugares se han encontrado partículas de vidrios volcánicos. El color del epipedón es negro, con ligeras variaciones debidas a la mayor o menor cantidad de materia orgánica. La fertilidad natural de estos suelos es moderada.
- Conjunto Monserrate: Este conjunto se encuentra constituido por suelos de profundidad efectiva muy superficial y superficial, con espesores menores de

50 cm que descansan sobre areniscas consolidadas o poco meteorizadas. Son suelos de colores negros o pardos grisáceos muy oscuros, con textura que varía de franco a franco arcillosa. La fertilidad natural es baja.

Suelos sobre Areniscas:

- Asociación Monserrate-Cabrera (MO): Esta asociación se encuentra localizada en las partes altas de la cuenca del río Checua. El conjunto predominante es Monserrate con pequeñas inclusiones de Cabrera, que ocupa los lugares con menores pendientes. El relieve es fuertemente quebrado, de 25-50 y más de 50% de pendiente.

3.3.6. Vegetación.

En el área de la cuenca del río Checua, durante los últimos años se han venido desarrollado jornadas de reforestación con especies foráneas (Acacia, Pinus) y obras para frenar la erosión, con éxito parcial, debido al manejo inadecuado que se ha dado a un ecosistema muy frágil, el cual ha sufrido una fuerte y extensa erosión con cárcavas profundas⁸¹.

En los bosques densos así creados, no hay sotobosque, ni cobertura de suelo con vegetación de hierbas y musgos, lo cual significa que la protección contra la erosión no es completa y su efecto sobre la biodiversidad es desastrosa, ya que no dejan crecer las especies de la vegetación natural.

Donde se observa todavía áreas abiertas, se encuentra una flora relativamente rica en especies herbáceas, parecida a la de la región semiárida de Mondoñedo, al occidente de Mosquera.

Por otro lado, la vegetación nativa de Alisos, Encenillos, Gaques, o el Bosque seco, con la Condalia, Espino, Mortiño, Tunos, Coronos, Dividivi, le dan un rasgo característico que identifica la cuenca del Checua. Todo ha sido el resultado de una

⁸¹ CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Cuenca hidrográfica del río Checua Exploración por el tiempo y el espacio. Bogotá, 2016.

naturaleza cambiante, dinámica que en millones de años conformo la región⁸².

Adicionalmente, mediante el Decreto 2372 del 1 de julio de 2010, “*Por el cual se reglamenta el Decreto Ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto Ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones*”, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, por medio del Acuerdo 22 del 2009, estableció el Plan de manejo arqueológico, áreas arqueológicas protegidas y áreas de influencia del municipio de Nemocón.

Así las cosas, la cuenca del río Checua contiene las siguientes áreas protegidas, las cuales se localizan en sus alrededores. Conformadas por los cerros y colinas circundantes. Por el occidente en los cerros del Tunjo y la Leonera en el municipio de Cogua; continuando hacia el norte por las partes altas del municipio de Tausa y Cucunubá; por el suroriente las zonas altas de la vereda Barrancas en el municipio de Suesca y por el sur las veredas de Moguá, Perico y Astorga, y por el sur el cerro El Santuario en la parte alta de las veredas La Puerta, y Aguaclara del municipio de Nemocón, forman un anillo protector soporte de la Estructura Ecológica Principal, (EEP)⁸³.

⁸² GIRALDO, M y ALCÁZAR CAICEDO, C. “Modelo de distribución potencial de condalia thomasiana (Rhamnaceae), especie endémica del valle del río Checua, Sabana de Bogotá, Colombia” {En línea}. p. 142.

⁸³ CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Cuenca hidrográfica del río Checua Exploración por el tiempo y el espacio. Bogotá, 2016.

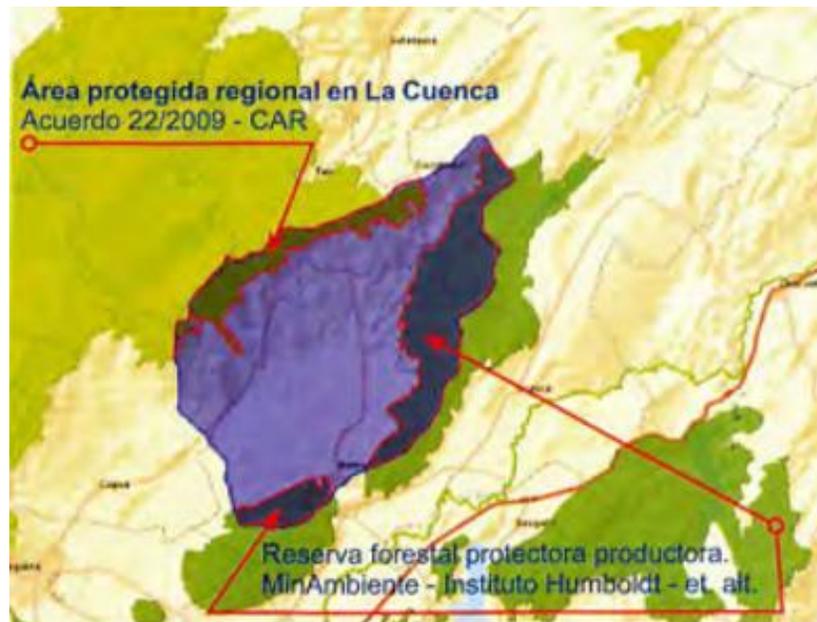


Figura 10. Áreas protegidas de la Cuenca del Río Checua
Fuente: Corporación Autónoma de Cundinamarca, 2016

3.3.6.1. Primer Paisaje – La Planicie

En la parte más baja el valle del Río Checua está cubierta en su mayoría por pastizales para ganado lechero. En segundo lugar, los cultivos de flores que demandan la mayor cantidad de mano de obra local, y son señalados como los responsables de los mayores desequilibrios ambientales por la perforación de pozos profundos para su actividad.

Desde la planicie, los eucaliptos constituyen la única vegetación arbórea que detiene la vista, distribuidos en escasas líneas sobre los linderos de los predios y unas que otras líneas de acacias y de sauces componen toda la vegetación del valle, las plantas nativas prácticamente fueron eliminadas del sector.

El paisaje de esta planicie se sustenta en los suelos nacidos en los procesos de sedimentación del antiguo lago, al que contribuyeron los depósitos de cenizas volcánicas y la erosión de las laderas del entorno.

3.3.6.2. Segundo Paisaje – Cerros y Laderas Orientales

Al costado oriental de la cuenca, desde el cerro el Santuario, en los límites con Gachancipá, hasta la vereda Moguá, siguiendo el rumbo hacia el nororiente se extiende una colina ya intervenida, cubierta de praderas, con muy escasos cultivos, es una colina ancha que en su parte más alta gracias a su geología facilita la infiltración de las aguas lluvias, en un proceso que se dificulta por la disminución de las coberturas vegetales nativas. Es una zona conocida como de recarga hídrica, la misma que posibilitaba la infiltración de las aguas hacia los acuíferos profundos del valle del río Checua. Esta era una relación que unía la colina con el valle, relación que se deterioró cuando en las partes altas se deforestó, y en las partes bajas se comenzó a extraer las aguas mediante pozos profundos, la minería del carbón en las laderas de la colina también cumplió su función desconfinando los acuíferos a su paso, desviando y contaminado las aguas subterráneas⁸⁴.

3.3.6.3. Tercer Paisaje – Laderas Desérticas Erosionadas

Hacia el norte se encuentran las laderas de Moguá, en la vereda Barrancas del municipio de Suesca, con un paisaje más árido y seco que continua hacia el occidente bordeando el valle por la parte alta de la vereda Checua, un paisaje de laderas más empobrecidas que las anteriores. Allí se encuentra el renombrado "desierto de la Tatacoita", esta zona árida también se extiende hacia la vereda de Cerro Verde de Nemocón, parte media y baja de la vereda Alto de Aire de Cucunubá, de vegetación más achatada, de zonas más secas, donde se evidencia especies de ciros, cucharos, espinos, laureles, hayuelos, chilcos, uña de gato, cortadera y específicamente la especie endémica de esta área el Gurrumay (*Condalia Thomasiana*) con muy pocos individuos.

⁸⁴ GIRALDO, M y ALCÁZAR CAICEDO, C. "Modelo de distribución potencial de *condalia thomasiana* (Rhamnaceae), especie endémica del valle del río Checua, Sabana de Bogotá, Colombia" {En línea}. p. 150.

3.3.6.4. Cuarto Paisaje – Laderas de Patio Bonito, Pajarito y Cerro Verde

Aunque es una zona con similares características a la anterior, los yacimientos de arcilla definieron lo que es hoy el sector, un área de laderas suaves donde se presentan el conjunto de alteraciones al ambiente más fuerte y extendido, las explotaciones de arcilla de grandes, medianos y pequeños mineros.

3.3.6.5. Quinto Paisaje – Laderas Occidentales

Corresponde a las partes in medias y altas de las veredas de Patasica, Casablanca de Cogua, Veredas Chorrillo, Pajarito, Rasgatá Alto y Laderagrande de Tausa y, vereda Alto de Aire de Cucunubá, dentro del conjunto de la cuenca es una franja que se extiende por el costado occidental y norte.

Goza de suelos agrícolas de mediana profundidad, suelos negros semejantes a los de páramo, pero sujetos a manejos tradicionales que predicen su destino, un destino ya conocido, la erosión y la esterilidad. En el subsuelo se encuentra un gran volumen de reservas de carbón. Esta franja conserva algunos relictos de bosque de diversidad y porte más exuberante, allí nacen las principales quebradas que alimentan el río Checua. Es el área de la cuenca que en épocas de lluvias logra almacenar y regular el líquido de manera más eficiente.

3.3.7. Caracterización Climática

La distribución temporal de las lluvias depende en gran parte del desplazamiento latitudinal de la zona de convergencia intertropical (ZCIT). La zona de estudio se encuentra ubicada bajo la influencia de la circulación atmosférica tropical, compuesta esquemáticamente por núcleos de alta presión (anticiclones), centrados en unos trópicos y por una zona de depresión, denominada zona de convergencia intertropical (ZCIT), situada entre éstos.

La cuenca se caracteriza por ser una zona de lluvias escasas, anualmente caen 800 mm, pero debido al alto nivel de deterioro resultado de la deforestación y erosión de un área significativa, no es retenida y aprovechada adecuadamente.

3.4. ESTADO DEL ARTE

Como el objetivo de este proyecto está basado en un análisis de sensibilidad de un balance hídrico a partir de la obtención de información hidrometeorológica obtenida de estaciones meteorológicas y de sensores remotos (teledetección), a continuación, se describe los avances relacionados con la presente investigación.

Los balances hídricos desarrollados con datos obtenidos de estaciones meteorológicas han sido documentados y analizados de gran manera, razón por la cual no será necesario describir los antecedentes, investigaciones y enfoque teóricos de estas, por lo cual nos enfocaremos en los avances de investigación relacionados con la teledetección en la hidrología.

3.4.1. Aplicaciones de la teledetección en hidrología: estimación de la evapotranspiración mediante el método del triángulo.

En el año 2012 en la cuenca del río Henares localizada en la Península Ibérica – España, se desarrolló una investigación que tenía como objetivo determinar la aplicación de la teledetección en hidrología, a partir de estimaciones de la evapotranspiración mediante el método del triángulo, la cual consistió en determinar la evapotranspiración de la zona de estudio a partir de imágenes satelitales, toda vez que su determinación a escalas regionales es de gran dificultad, ya que no hay una forma directa para su medición, y la teledetección ha demostrado ser una herramienta importante para resolver ese problema.

Ahora bien, la investigación se desarrolló a través del método del triángulo, el cual está basado en la relación de la temperatura de la superficie con un índice de vegetación, este fue aplicado sobre imágenes satelitales (datos) obtenidas del satélite Landsat 5-TM, exactamente sobre una parcela heterogénea de 5x5 km de la cuenca del río Henares, parte de la cuenca del río Tajo en el centro de España. Así mismo, se realizaron mediciones in situ, realizadas durante la temporada de crecimiento de un campo de trigo experimental en 2010, esto a través de un dispositivo científico denominado escintilómetro, el cual estima el flujo de calor sensible (H), flujo de calor del suelo (G), radiación neta (Rn) y otros datos meteorológicos, que se utilizaron para obtener tasas reales de evapotranspiración

(ET) a escala de campo, con el fin de correlacionarlas con los datos obtenidos a partir de la teledetección⁸⁵.

Dentro de la investigación, se recomienda aplicar una máscara que eliminaba diferencias significativas en la estructura de la elevación, la pendiente o la cobertura del suelo con el sitio de campo experimental, antes de ejecutar el algoritmo en las imágenes satelitales. Una vez realizado el enmascaramiento, se usaron mapas estimados de fracción de evaporación, en combinación con mediciones de flujo de calor del suelo (G) y radiación neta (Rn) en el sitio, para obtener tasas de evapotranspiración (ET) a escala local⁸⁶.

Los resultados de la validación mostraron una buena concordancia con los valores observados, RMSE = 45.91 W/m², considerando una subestimación importante pero lineal (sesgo = -45.13 W/m² y R² = 0.9875). Por lo tanto, se puede argumentar que el método del triángulo es útil para estimar la evapotranspiración a escala local, y potencialmente a escala regional, ayudando a los responsables de la toma de decisiones y a los planificadores a gestionar los recursos hídricos.⁸⁷

En cuanto a la aplicación de la teledetección en la hidrología, este trabajo realizado en España mostró uno de los usos de la teledetección en el campo de la hidrología, en una escala local, como potencialmente a escala regional. Una vez desarrollada la investigación sobre la zona de estudio, esta arrojó resultados satisfactorios, incluso según sus autores, mejorando trabajos anteriormente desarrollados.⁸⁸

Adicionalmente, como conclusiones y recomendaciones, este proyecto de investigación arrojó, que se debe considerar la elección del dominio espacial donde aplicar el método, toda vez que se debe tener en cuenta una ventana adecuadamente amplia para almacenar todas las condiciones de cobertura vegetal

⁸⁵ TOMÁS, Albert, NIETO Héctor, GUZINSKI Radoslaw, SANDHOLT Inge, BERLINER Pedro, "Aplicaciones de la teledetección en hidrología: estimación de la evapotranspiración mediante el método del triángulo" {En línea} {12 abril de 2020}. Disponible en: http://www.cpaisaje.org/geomatica_agua/Cuadernos%20de%20Geomatica_1-16x24cm.pdf. P.120.

⁸⁶ Ibid., p.122.

⁸⁷ Ibid., p. 121.

⁸⁸ Ibid., p. 124.

posibles, y humedad, y a la vez convenientemente pequeña para mantenerlas condiciones meteorológicas homogéneas. Así mismo, se debe analizar que la presencia de zonas dentro del dominio no siempre puede encontrarse tasa evaporativa máxima como mínima.

Finalmente, el desarrollo del trabajo, permitió establecer que las imágenes suministradas por el satélite Landsat 5-TM, demostraron una resolución espacial idónea, para el trabajo a una escala local. No obstante, debido a su resolución temporal baja, genera que no sea posible desarrollar un continuo monitoreo de las mediciones. Razón por la cual, se determina, que se corre el riesgo de disponer de menor número de imágenes que se han consideradas válidas para la investigación, es decir, no afectadas por condiciones meteorológicas adversas. En consecuencia, se hace necesario combinar y/o complementar la información obtenida de Landsat con otros sensores remotos con cuenta con una mayor resolución temporal, como es el caso de MODIS (4 imágenes diarias) o MSG-SEVIRI (cada 15 minutos), y con esto logra una estimación más operativa de la evapotranspiración.⁸⁹

3.4.2. Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales.

En el año 2011, un estudiante de maestría en Tecnologías de la Información Geográfica de la Universidad Complutense de Madrid, elaboró una investigación sobre las aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica – SIG y la teledetección, en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de la mancha húmeda, la cual consistió en efectuar un inventario de los humedales localizados en el área de estudio, para lo cual la investigadora realizó una revisión bibliográfica, para posteriormente desarrollar un itinerario para visitar las lagunas inventariada mediante un Sistema de Información Geográfica – ArcGIS 10, en las visitas de campo se realizaron tomas de agua en las siete (7) lagunas previamente seleccionadas para analizar su contaminación hídrica.

Posteriormente, se trabajó con información suministrada de la aplicación Earth Science Data Interface (ESDI) de la Web Global Land Cover Facility y del Plan

⁸⁹ Ibid., p. 124.

Nacional de Teledetección del IGN, los cuales contaban con imágenes de los sensores ETM y TM del satélite Landsat y del satélite SPOT, para finalmente seleccionar aquellas imágenes que contemplaran registros de información de dos décadas correspondientes a distintas épocas y años, con el fin de contar con la mayor variabilidad de los vasos lagunares, en cuanto a concentración de solutos, contenido en agua y de los cultivos del entorno.⁹⁰

De acuerdo con la investigadora, se escogió como fecha más antigua el año 1989 y como más reciente el año 2009, ya que, según información de la Agencia Estatal de Meteorología, estos dos años presentaron similitudes pluviométricas. Así mismo, se descartaron todas las imágenes generadas del año 2000, para el estudio de la contaminación hídrica, y para el análisis de los cambios en la cubeta, orla de vegetación natural y usos de suelo las del año 1989, 2000, 2009 y 2010.⁹¹

En cuanto a los resultados obtenidos, se logró inventariar un total de 89 humedales obteniendo información relacionada con la contaminación hídrica y cambios en la cubeta de las lagunas inventariadas, esto a través de la información suministrada a través de las imágenes de satélite, los estudios de campo y los análisis de agua, con los cuales se confirman la gran diversidad de humedales con comportamientos hídricos muy dispares y diferente estado de conservación.

Así mismo, se ha logrado determinar los cambios experimentados a lo largo de 20 años en las lagunas estudiadas, debido principalmente a causas antrópicas, esto gracias a la cartografía de los perímetros de máxima inundación y de la orla de vegetación natural, junto a las imágenes en falso color y NDVI. Adicionalmente, gracias a la óptima resolución de las imágenes SPOT, se ha podido conocer las alteraciones morfológicas más importantes en el entorno próximo de cada laguna, así como la regulación del flujo de sus aguas.⁹²

⁹⁰ PÉREZ ORTEGA, María, Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de la mancha húmeda. Madrid, 2011. 26p. Trabajo de investigación (magíster en tecnologías de la información geográfica). Universidad Complutense De Madrid. Facultad de geografía e historia

⁹¹ Ibid., p. 27

⁹² Ibid., p. 92

Finalmente, como conclusiones la investigadora afirma que, gracias a las imágenes de satélite del periodo estival, se ha podido detectar la presencia de contaminación y eutrofización de sus aguas, así mismo, las imágenes en falso color y color natural resultan muy útiles para diferenciar la vegetación acuática de la vegetación higrohalófito natural, evidenciando que la aplicación de la teledetección en el estudio de los humedales arroja resultados satisfactorios.

Ahora bien, las imágenes de filtro de paso alto, obtenidas de los satélites landsat y SPOT, fueron determinantes para conocer la regulación del flujo de sus aguas, así como las alteraciones morfológicas más importantes del entorno más próximo de cada laguna. No obstante, la toma de fotografías y las visitas in situ se consideran necesarias.⁹³

Adicionalmente, con la clasificación de las imágenes, se ha logrado evaluar y cotejar la superficie de regadío existente hace veinte (20) años, y con el área de influencia definida para los humedales estudiados, con la actualidad, siendo esencial las visitas de campo para evidenciar la veracidad en terreno.⁹⁴

Finalmente, en las recomendaciones se afirma que, al contar con un número mayor de imágenes de diferentes épocas del año y realizar toma repetida de análisis de agua, permitiría conocer con mayor exactitud el estado de los humedales, predecir su futura viabilidad y/o recuperación.

3.4.3. Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG.

En el año 2017, dos estudiantes de la Universidad de Córdoba de la facultad de Ingeniería Ambiental realizaron una investigación con el objetivo de determinar el número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG, cuyos resultados fueron publicados en un artículo de investigación por la Universidad de Córdoba.

⁹³ Ibid., p. 98

⁹⁴ Ibid., p. 98

La investigación consistía en determinar la escorrentía de la subcuenca de Betania ubicada en el departamento de Córdoba – Colombia, a partir de la caracterización del número de curva (NC), determinada a partir de imágenes espaciales sobre las coberturas y suelo de la zona de estudio. Las coberturas del terreno fueron establecidas a partir de la teledetección, mientras que el sistema de información geográfica (SIG) permitió generar una capa de grupos hidrológicos de suelo y combinar los datos para obtener un mapa del número de curva.⁹⁵

Como resultado, se obtuvo que la mayor parte del área de la subcuenca de Betancí, tiene un número de curva (NC) entre 81 y 86, evidenciando que el 85% del área total está cubierta por pasto, y el 83% de los suelos tienen un alto potencial de escorrentía. Con estas condiciones, se determina que la escorrentía tiende a ser mayor a la infiltración con lo cual generar inundaciones, favorecen los procesos erosivos, e incluso la desertificación del territorio.⁹⁶

Para la obtención de los referidos resultados, se trabajó con el mapa de suelos del Departamento de Córdoba, elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, en el año 2009, con una escala 1:100.000 y una imagen obtenida a través de sensores remotos, en este caso el satélite Landsat 8, del 20 de agosto de 2014 (path 9 row 54) con baja nubosidad en la zona de estudio.⁹⁷

En relación con lo expuesto anteriormente, los autores del artículo determinaron que la apropiada determinación del comportamiento espacial del número de curva obedece a la calidad de la información cartográfica disponible, razón por la cual, sea hace estrictamente ineludible establecer la exactitud temática del mapa de coberturas, a través del uso de índices como el coeficiente Kappa y la fiabilidad global. Los resultados de la clasificación son aceptables.⁹⁸

⁹⁵ DIAZ CARVAJAL, Ángel, MERCADO FERNÁNDEZ, Teobaldis, Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. En: Ingeniería y Desarrollo. Vol. 35. No 2 (Jul-Dic. 2017); p. 453

⁹⁶ Ibid., p. 453

⁹⁷ Ibid., p. 457

⁹⁸ Ibid., p. 462

Finalmente, en la investigación realizada, se concluyó y recomendó que, con esta, se demuestra que la información disponible a través de sensores remotos, permite el desarrollo de la teoría del número de curva en la subcuenca de Betancí del Departamento de Córdoba, por lo que debe aplicar en otras cuencas hidrográficas del referido Departamento. Así mismo, se determina que las futuras investigaciones pueden orientarse al estudio de las oscilaciones espaciotemporales del número de curva, beneficiando la capacidad de los sensores remotos para capturar los cambios que ocurren en la superficie terrestre.

4. METODOLOGÍA

4.1. FASES DEL TRABAJO DE GRADO.

La metodología a desarrollar en el proyecto denominado “Comparación de un balance hidrológico de la cuenca del Río CHECUA haciendo uso de métodos tradicionales (estaciones meteorológicas) y de sensores remotos (teledetección), a partir de análisis de sensibilidad”, es de tipo descriptiva y cuantitativa, toda vez que se realizará en respuesta a los objetivos planteados para el desarrollo de la referida investigación, razón por la cual, a continuación se describe el procedimiento y sus características en función de los resultados conseguidos, en las siguientes fases:

4.1.1. Fase 1: Obtención de información.

- Analizar la información meteorológica obtenida de las siete (7) estaciones seleccionadas (CAR) y de los satélites del servidor GIOVANNI (Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM y MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5) con influencia sobre la cuenca del Río Checua, mediante hojas de cálculo del programa computacional Microsoft Excel.

Para el cumplimiento de estos objetivos se partió de la caracterización morfométrica del área de estudio a través de un modelo de elevación digital del terreno (DEM), desarrollada por los investigadores, la cual fue utilizada para establecer las estaciones meteorológicas de mayor influencia sobre la cuenca y las coordenadas geográficas para la obtención de las imágenes satelitales a partir de sensores remotos (teledetección).

- **Estaciones meteorológicas:**

Para los fines del proyecto de investigación, se escogieron siete (7) estaciones meteorológicas de la Corporación Autónoma Regional – CAR, las cuales están localizadas dentro de la cuenca. Las estaciones fueron seleccionadas por encontrarse estratégicamente ubicados, ya que estas no presentan variaciones bruscas de pendiente y topografía que afecten la representatividad de los datos, así

mismo, se encuentran activas y registrando información climatológica hace más de 20 años.

En la Tabla 5, se relaciona la información de los datos de las estaciones utilizadas dentro del proyecto, describiendo el nombre de cada una, su código respectivo, el tipo de estación, su estado actual de operación y la altura a la cual se encuentra, Así mismo, en la ilustración 8 se presenta la delimitación de la cuenca y la ubicación de las siete estaciones meteorológicas utilizadas para el proyecto de investigación.

| ESTACIÓN | ID | ESPECIFICACIONES | CÓDIGO | ALTURA (m) | ESTADO |
|-----------------|-----------|--------------------------------------|---------------|-------------------|---------------|
| LADERA GRANDE | 1721 | Pluviométrica Convencional | 2120169 | 2956 | ACTIVA |
| HOYO ARRIBA | 1719 | Pluviométrica Convencional | 2120167 | 2921 | ACTIVA |
| CHECUA | 1753 | Climatológica principal Convencional | 2120540 | 2580 | ACTIVA |
| ALTO AIRE | 1720 | Pluviométrica Convencional | 2120168 | 2796 | ACTIVA |
| EL LLANO | 1722 | Climatológica Ordinaria Convencional | 2120170 | 2838 | ACTIVA |
| BARRANCAS | 1695 | Pluviométrica Convencional | 2120095 | 2913 | ACTIVA |
| ACANDY | 1709 | Pluviométrica Convencional | 2120141 | 2596 | ACTIVA |

Tabla 5. Estaciones meteorológicas seleccionadas para el balance hídrico de la cuenca del Río Checua.

Fuente: Red Hidrometeorológica – Sistema de Información Climatológica e Hidrológica - SICLICA CAR

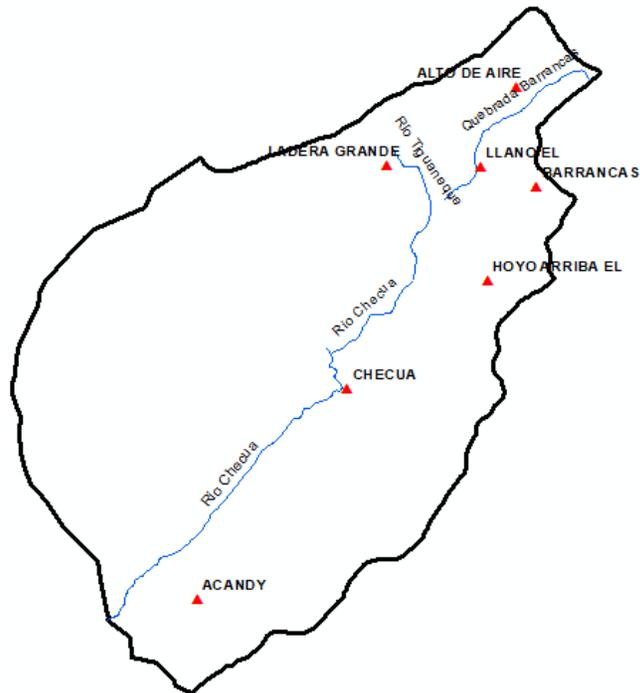


Ilustración 8. Delimitación de la cuenca del río Checua y localización de las siete estaciones meteorológicas.

Fuente: Autores

En los casos, en que los registros de información de precipitación y temperatura obtenidos de los reportes de las estaciones meteorológicas presentaron datos faltantes, estos fueron complementados a través de correlaciones simples y el método del inverso de la distancia – IDW, dependiendo del número de datos y de la ubicación de las estaciones. Así mismo, estos datos faltantes, fueron cuantificados y utilizados para el análisis de resultados.

Finalmente, la información climatológica obtenida de las estaciones meteorológicas fue organizada, tratada y analizada a través de hojas de cálculo del programa EXCEL.

- **Sensores Remotos (Teledetección):**

Para la obtención de los registros de las variables climatológicas de precipitación y temperatura a través de la teledetección, se determinó que se obtendrían a partir del satélite meteorológico Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM (precipitación) y Model M2TMNXFLX v5 (temperatura), los cuales hacen parte del sensor remoto GIOVANI, misión espacial desarrollada entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) designada para monitorear y estudiar las precipitaciones tropicales.

Este sensor remoto fue seleccionado ya que cuenta con 5 sensores a bordo, lo que lo hacen una herramienta idónea para los fines investigativos de este estudio, ya que dichos sensores van enfocados a obtener información relevante para el desarrollo del proyecto (variables climatológicas):

- Imágenes de Relámpagos (LIS). PR, TMI y VIRS
- Imágenes de microondas (TMI)
- Precipitación de radar (PR)
- Sistema de Energía Radiante de la Tierra y de las Nubes (CERES)
- Escáner del visible y del 19 infrarrojo (VIRS)

Estos sensores son utilizados para la medición de la lluvia, sin embargo, cada uno cuenta con un principio de observación y ancho de banda diferente: 215 km para PR (JAXA, 2007), 720 km para VIRS y 760 km para TMI.

Adicionalmente, el radar meteorológico de precipitación (PR) suministra cartas de distribuciones de tormentas tridimensionales. En este, se emite radiación y se reciben lecturas de profundidad de la tormenta, tipo de lluvia, intensidades y distribución de la lluvia; además puede evaluar el calor logrado a diferentes alturas en la atmósfera.

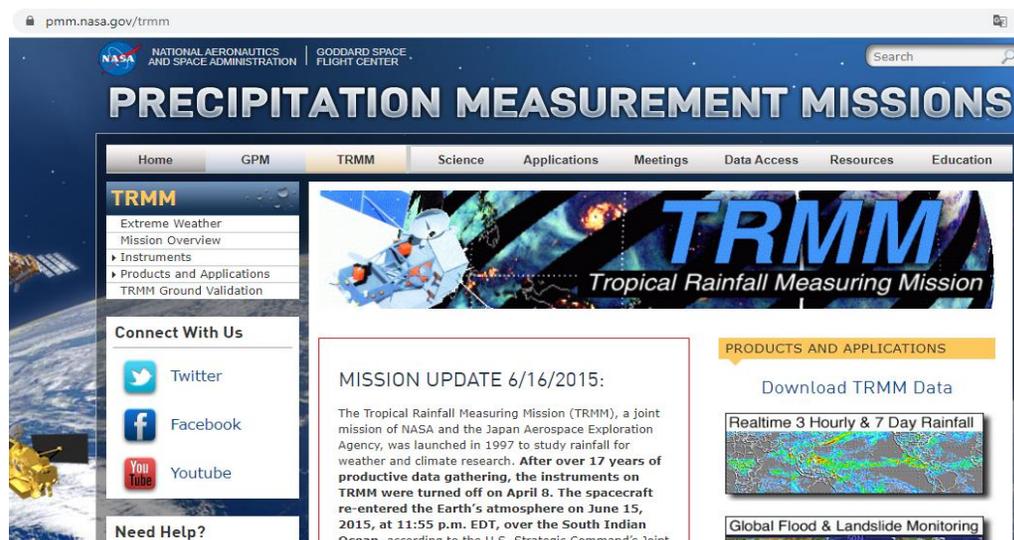


Ilustración 9. Página de inicio del satélite Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM

Fuente: <https://gpm.nasa.gov/multimedia/images/TRMM>

Para la obtención de los registros de precipitación y temperatura de los satélites TRMM y Model M2TMNXFLX v5, se ingresó a la página web <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> del servidor Giovanni de la NASA, el cual ofrece información para descarga gratuita de Imágenes de precipitación y temperatura de diferentes satélites.

Al ingresar a la página de inicio, se puede realizar la consulta y descarga de la información que se solicite al servidor, pero con limitaciones para su visualización y tratamiento de los datos adquiridos, razón por la cual es necesario registrarse para poder descargar la información en formato tiff y hoja de cálculo de Excel (csv y xls).

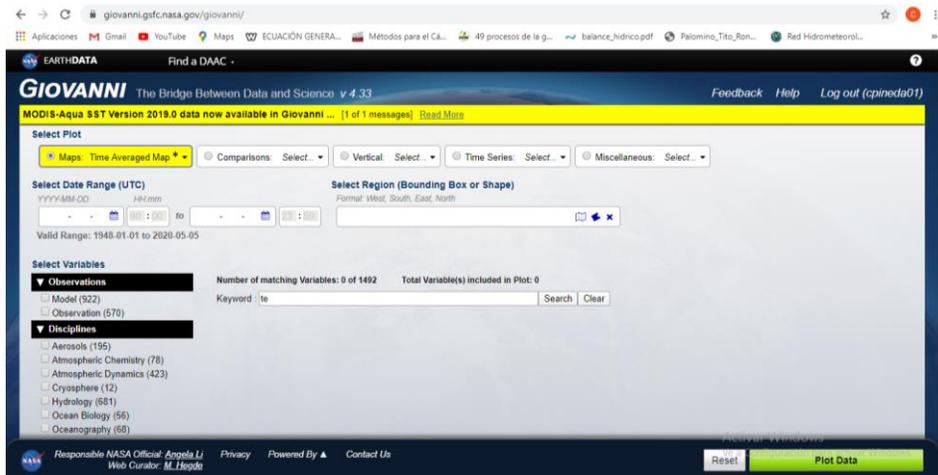


Ilustración 10. Página servidor Giovanni de la NASA

Fuente: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

El servidor GIOVANNI permite seleccionar el rango de fechas desde el 01 de junio de 1948 hasta un día anterior de la consulta.

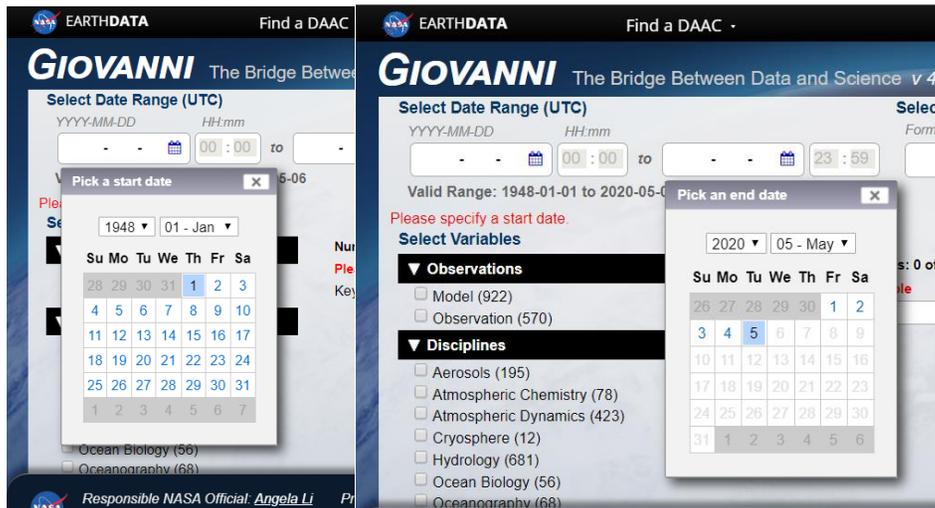


Ilustración 11. Rango de tiempo para la obtención de las imágenes satelitales

Fuente: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

En cuanto a la localización de la zona que se desea adquirir las imágenes satelitales, el servidor permite el ingreso de coordenadas geográficas de 4 puntos (norte, sur, este y oeste) o cuenta con un geovisor que permite la navegación por la órbita terrestre y dibujar un rectángulo sobre el área deseada.

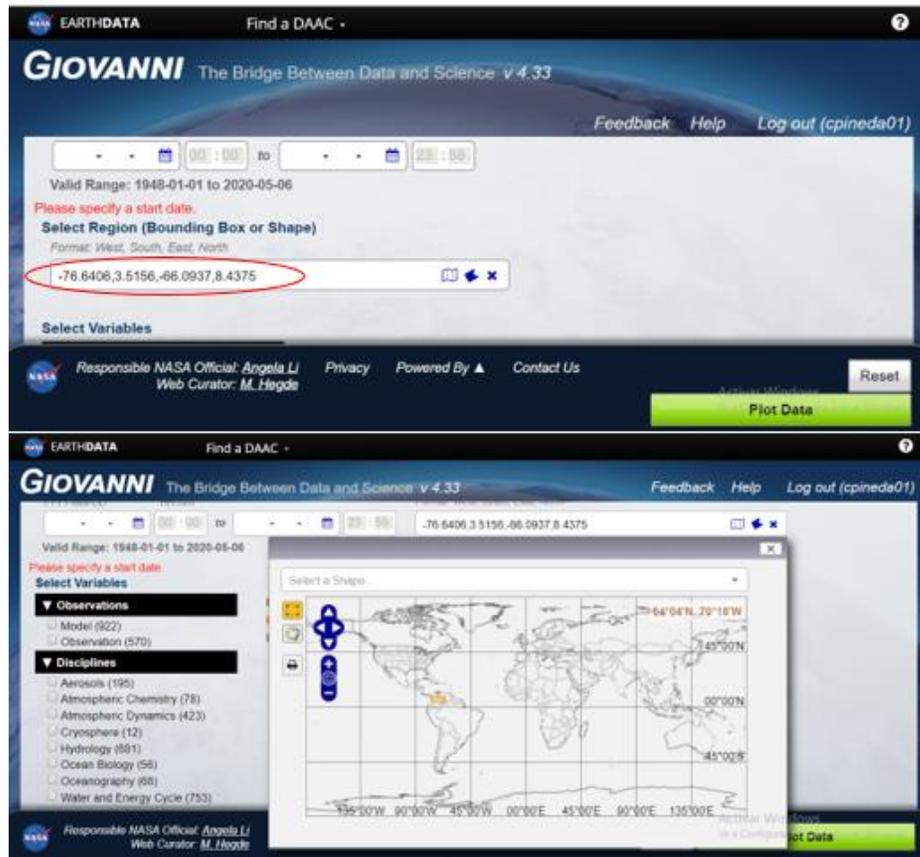


Ilustración 12. Localización del área de estudio –servidor GIOVANNI
Fuente: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

En la opción keyword se escribe la variable meteorológica que se desea consultar y de la cual el servidor nos permitirá obtener el registro de información (raster) de uno de los satélites disponibles.

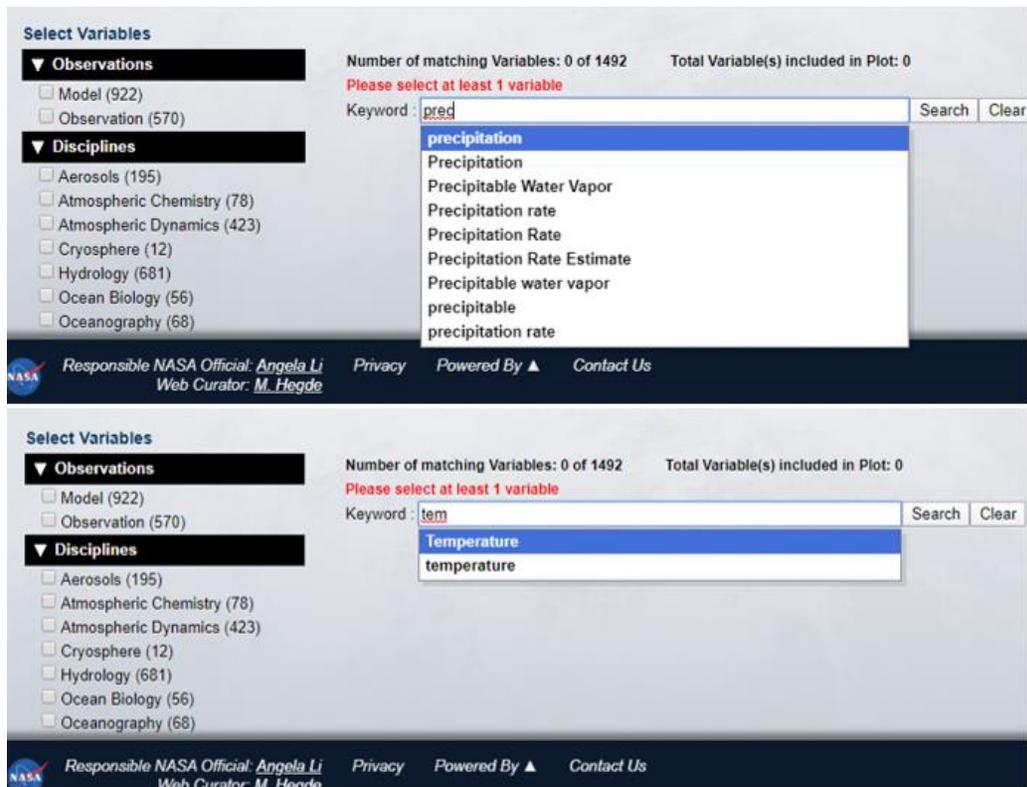


Ilustración 13. Seleccionador de la variable climatológica a descargar
Fuente: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

Adicionalmente, al dar clic en el botón buscar, el servidor GIOVANNI desplegará una lista de satélites inscritos a este, de los cuales se podrá obtener los raster de las variables meteorológicas deseadas (imágenes satelitales) y determinar las unidades de estas.

Una vez seleccionado el satélite con la información solicitada, se procede a dar clic en el botón PLOT DATA, para posteriormente generar la imagen deseada y exportarla una extensión deseada.

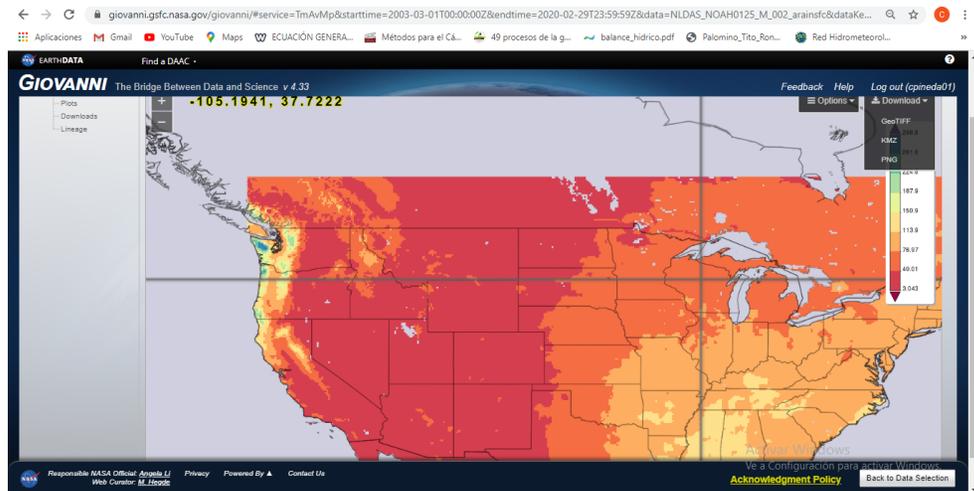


Ilustración 15. Imagen satelital de la precipitación del satélite NOAA0125.

Fuente: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

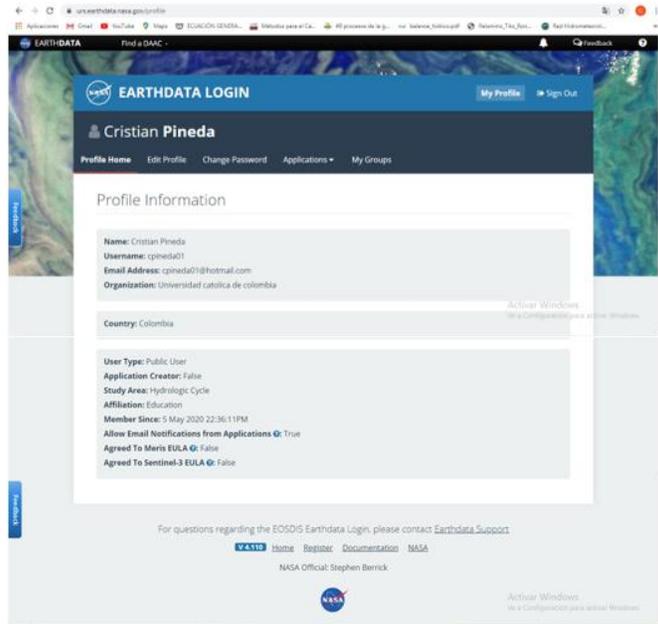


Ilustración 16. Página de registro satélite de la NASA

Fuente: <https://urs.earthdata.nasa.gov/profile>

Finalmente, la información climatológica obtenida de las imágenes satelitales suministradas por el servido GIOVANNI de la NASA, fue organizada, tratada y analizada a través del programa computacional Excel.

4.1.2. Fase 2: Balance Hídrico.

- Desarrollar el modelo hidrológico de la cuenca de Río Checua, a partir de la información obtenida de estaciones meteorológicas y datos de la teledetección.
- Determinar el balance hídrico superficial de la cuenca del Río Checua, a través del análisis de la variabilidad temporal y espacial de los eventos de precipitación y temperatura.

Para el desarrollo de los objetivos orientados al cálculo del balance hídrico de la cuenca del Río Checua, se utilizó la información de las estaciones meteorológicas e imágenes satelitales, que se encuentran dentro del área de influencia de la cuenca objeto de estudio, mismas que cuentan con registros históricos de información climática que caracteriza la zona de interés (precipitación y temperatura).

Ahora bien, en cuanto a la variable de evapotranspiración, la cual es necesaria en la ecuación del balance hídrico, fue calculada a través del método de Thornthwaite, toda vez que este, presenta dos importantes ventajas:

1. Los registros de información de precipitación y temperatura necesarios para los cálculos son obtenidos a través de las estaciones climatológicas e imágenes satelitales
2. Thornthwaite emplea valores solamente climáticos para expresar el valor relativo de la precipitación.

Finalmente, el análisis del balance hídrico se basó en el desarrollo del principio de conservación de masas, o ecuación de la continuidad. En este se establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la

diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada⁹⁹

4.1.3. Fase 3: Resultados

- Emplear el análisis de sensibilidad sencillo para catalogar cualitativamente la información extraída de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas y del uso de la teledetección, con el fin de determinar si los registros climatológicos captados por los sensores remotos, pueden ser considerados confiables para la cuenca del Río Checuá, estableciendo como datos de referencia los proporcionados por las estaciones.

Para la fase tres de la investigación, se implementó un análisis de sensibilidad de métodos de selección, en el cual se realizó un estudio cualitativo de los datos obtenidos por las estaciones meteorológicas e imágenes satelitales, con el fin de determinar relaciones que existen entre la información de entrada (precipitación y temperatura) y salida de la investigación (balance hídrico por método convencional y teledetección), tomando como datos de referencia, los registros climatológicos de las estaciones meteorológicas, ya que estas cuentan con mayor volumen de información e investigaciones de la CAR relacionadas en la zona de estudio.

Con el análisis de sensibilización de métodos de selección, se logró determinar los parámetros de entrada, que más influyen en la variabilidad de la salida, con el fin de establecer que técnica de obtención de información climatológica, proporciona registros climatológicos más completos y fiables, en razón de comparar los datos de entrada de precipitación y temperatura, con los datos de salida de percolación, déficit y evotranspiración real (ETR).

Aunado con la anterior, se estableció que el desarrollo del análisis de resultados no conllevó a un modelo matemático, sino se basó en la identificación de variables

⁹⁹ VÁZQUES, 2002 citado por JUELA, Oscar. Estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca alta del río Catamayo hasta la estación el arenal en el sitio el boquerón, provincia de Loja. Loja. 2011, 28-31p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería agrícola) Pontificia Universidad Nacional de Loja. Área agropecuaria y de recursos naturales renovables.

cualitativas identificadas de la obtención de información por estaciones meteorológicas e imágenes satelitales suministradas por el uso de la teledetección, las cuales, los autores basados en sus conocimientos y los de asesor del proyecto, referencias bibliográficas y estudios previos realizados sobre el área de estudio, determinaron con forme al estado de la información suministrada, cuál de estas presentó y mayor grado de incertidumbre.

Para determinación el grado de confiabilidad de la información suministrada por las estaciones meteorológicas y los sensores remotos, se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

Estaciones Meteorológicas:

- Disponibilidad de la información de las siete (7) estaciones meteorológicas, en función de su estado actual, ubicación, condiciones climáticas y de paisaje a las que ha estado expuesta.
- Datos vacíos del registro de precipitación de las siete estaciones meteorológicas.
- Datos vacíos del registro de temperatura de la estación climatológica principal denomina CHECUA, la cual se localiza dentro de la zona de estudio.
- Tiempo de registro de las variables de temperatura y precipitación de cada una de las estaciones. Con lo cual se determinó la homogeneidad del periodo común del registro de la información.
- Validación de la estructura del registro de datos: Se comprobó que tanto la estructura del registro como el número de datos son los que se espera que lleguen por cada estación.
- Validación de la coherencia temporal de la serie: se aplicó sobre las series temporales de datos del periodo que se analizaron, razón por la cual se calculó la media y la desviación típica de cada variable.

- Validación de la coherencia espacial. Contraste de los datos de cada estación con datos de otras estaciones.

Sensores remotos (imágenes satelitales)

- Calidad de imagen y resolución: Se analizó de acuerdo con la información disponible en el servidor GIOVANNI, la resolución espacial y temporal de las imágenes obtenidas de la zona de estudio.
- Se analizó la longitud de onda del sensor remoto del cual se obtuvieron las imágenes satelitales (captura de las variables de precipitación y temperatura).
- Análisis de la profundidad del sensor remoto y de la imagen captada por este.
- Se analizará las características espaciales del sensor remoto, con el fin de determinar si es el más idóneo para la obtención de imágenes satelitales con fines climatológicos.
- Se tuvieron en cuenta las unidades en las cuales el sensor remoto arroja las imágenes satelitales.
- Se analizó la disponibilidad de la información de precipitación y temperatura en relación con el tiempo de registro de los datos.

Finalmente, al analizar cada una de estas variables y procesar sus resultados de manera cualitativa, se determinará los factores más relevantes de cada uno de los métodos de registro de información a la hora de realizar un balance hídrico de una zona en específico.

Conclusión de los resultados esperados:

Se determinó el balance hídrico de la cuenca del Río Checua (Cundinamarca), a través de información suministrada por métodos convencionales (estaciones climatológicas) y no convencionales (teledetección – sensores remotos) para un

periodo común de lluvias de 20 años (1988 – 2018), tomando como datos base los registros climáticos de las estaciones seleccionadas para la investigación, con el fin de establecer el grado de incertidumbre en sus datos reportados por los sensores remotos.

Razón por la cual se determinó, si las variables de precipitación y temperatura obtenidas de estaciones meteorológicas y de imágenes satelitales (datos de entrada), afectaron el resultado del balance hídrico (datos de salida: percolación, déficit y evapotranspiración real), realizado para cada método.

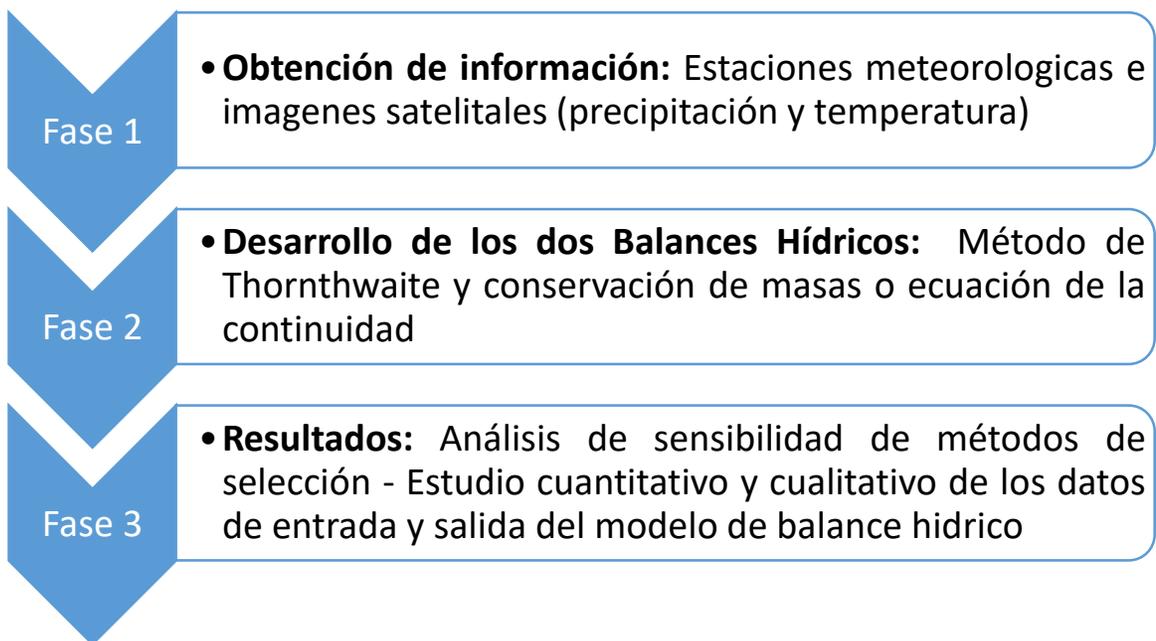


Ilustración 17. Resumen de la metodología de las fases de trabajo de la investigación.

Fuente: Autores

4.2. INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Durante el desarrollo del proyecto de investigación “Comparación de un balance

hidrológico de la cuenca del Río Checua haciendo uso de métodos tradicionales (estaciones meteorológicas) y de sensores remotos (teledetección), a partir de análisis de sensibilidad”, se utilizó las siguientes herramientas y/o instrumentos:

- Estaciones meteorológicas

Se emplearon los registros de siete estaciones meteorológicas de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, las cuales se encuentran ubicadas dentro de la cuenca del Río Checua.

Las estaciones proporcionarán los registros de precipitación y temperatura solicitados por los autores del proyecto.

- Imágenes satelitales provenientes del servidor GIOVANNI de la NASA.

A través del servidor GIOVANNI de la NASA, se descargaron las imágenes satelitales, con las cuales se obtendrán los registros de precipitación y temperatura de la cuenca del Río Checua.

- Programa EXCEL – Hojas de cálculo.

Por medio del programa computacional Excel, se organizó y se realizó el tratamiento (procesamiento) de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas y las imágenes satelitales, con el fin de realizar los respectivos cálculos y análisis correspondientes.

- Programa WORD

El programa computacional denominado Word, se utilizó para presentar la información obtenida del desarrollo de la investigación.

- Software ArcGIS

El software ArcGIS fue de vital importancia, ya que este será utilizado para obtener información necesaria para el cálculo de los balances hídricos. Así mismo la razón de su implementación se debe al conocimiento de los autores en este programa.

Finalmente, la descripción, la aplicación y la razón de la implementación de cada uno de los instrumentos y/o herramientas utilizados en el proyecto “Comparación de un balance hidrológico de la cuenca del Río Checua haciendo uso de métodos tradicionales (estaciones meteorológicas) y de sensores remotos (teledetección), a partir de análisis de sensibilidad”, fueron presentados de manera detallada en cada una de las fases de trabajo de la investigación.

4.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

De acuerdo con el desarrollo del proyecto de investigación “Comparación de un balance hidrológico de la cuenca del Río Checua haciendo uso de métodos tradicionales (estaciones meteorológicas) y de sensores remotos (teledetección), a partir de análisis de sensibilidad”, a continuación, se describen los alcances y limitaciones del mismo:

- Alcances:

El presente estudio se analizó la calidad de la información climatológica registrada y disponible en las siete estaciones meteorológicas (LADERA GRANDE, HOYO ARRIBA, CHECUA, ALTO AIRE, EL LLANO, BARRANCAS y ACANDY) de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR respectivamente (método convencional), frente a la información suministrada a través de métodos no convencionales como los son los sensores remotos (teledetección) del servidor GIOVANNI de la NASA, en la zona de la cuenca de Río Checua, a través del balance hídrico de ambos métodos, analizados a partir de un análisis de sensibilización de métodos de selección.

El proyecto de investigación estuvo sujeto a la interpretación cuantitativa y cualitativa de los autores, en cuanto a las variables que los mismos determinaron como relevantes para el desarrollo del análisis de sensibilización de métodos de selección, el cual permitió establecer la homogeneidad o no, de los registros de información suministrados por estaciones meteorológicas y teledetección.

- Limitaciones:

La investigación “Comparación de un balance hidrológico de la cuenca del Río Checua haciendo uso de métodos tradicionales (estaciones meteorológicas) y de sensores remotos (teledetección), a partir de análisis de sensibilidad”, abarca únicamente el registro de información climatológica de siete estaciones meteorológicas ya seleccionadas y de imágenes satelitales obtenidas del servidor GIOVANNI de la NASA, con la cuales se realizaron los balances hídricos de la cuenca de Río Checua, y se establecerá por medio del análisis de sensibilidad de métodos de selección, los datos más completos y fiables, tomando como base los datos proporcionados por las estaciones.

La información climatológica necesaria para el desarrollo de la investigación estuvo sujeta a la disponibilidad del acceso de los registros de cada una de las estaciones seleccionadas, así como el periodo de tiempo de inicio de los registros y de las condiciones naturales de su ubicación.

La información obtenida de las variables meteorológicas de imágenes satelitales estuvo sujeta a la calidad de estas, de acuerdo con la disponibilidad del servidor GIOVANNI de la NASA y el número de satélites registrados en el referido servidor.

El proyecto de investigación no tiene como objetivo la creación de un catálogo de sensores remotos, que cuente con información completa de variables climatológicas de precipitación y temperatura.

5. PRODUCTOS A ENTREGAR

Los productos a entregar, resultado del desarrollo de la investigación “Comparación de un balance hidrológico de la cuenca del Río Checua haciendo uso de métodos tradicionales (estaciones meteorológicas) y de sensores remotos (teledetección), a partir de análisis de sensibilidad” son:

- Hojas de cálculo con los registros de precipitación obtenidos de las estaciones meteorológicas: LADERA GRANDE, HOYO ARRIBA, CHECUA, ALTO AIRE, EL LLANO, BARRANCAS y ACANDY
- Archivo Excel de cálculo con los registros de temperatura obtenidos de la estación climatológica principal CHECUA
- Imágenes satelitales del servicio GIOVANNI de la NASA con un raster de la variable de precipitación.
- Imágenes satelitales del servicio GIOVANNI de la NASA con un raster de la variable de temperatura.
- Hoja de cálculo con la información de precipitación obtenida de las imágenes satelitales del servidor GIOVANNI de la NASA.
- Hoja de cálculo con la información de temperatura obtenida de las imágenes satelitales del servidor GIOVANNI de la NASA.
- Cálculos y resultados del modelo hídrico desarrollado a partir de los datos meteorológicos suministrados por las estaciones climatológicas.
- Cálculos y resultados del modelo hídrico desarrollado a partir de los datos meteorológicos suministrados por los sensores remotos (teledetección).
- Resultados del análisis de sensibilidad para codificar la información extraída de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas y del uso de la teledetección, con el fin determinar cuál método cuenta con la información

más confiable para la cuenca del Río CHECUA.

- Elaboración y presentación de un artículo IEEE sobre la investigación “Comparación de un balance hidrológico de la cuenca del Río Checua haciendo uso de métodos tradicionales (estaciones meteorológicas) y de sensores remotos (teledetección), a partir de análisis de sensibilidad”.

6. ENTREGA DE RESULTADOS E IMPACTOS ESPERADOS

Al obtener y tratar la información meteorológica de las estaciones climatológicas y de imágenes satelitales (sensores remotos), se realizó un balance hídrico de la cuenca del Río Checua con cada uno de los métodos planteados (convencional y teledetección), cuyos resultados fueron examinados a través de un análisis de sensibilidad, con el fin de determinar cuál fuente de información es más completa, en función de disponibilidad de número de datos, calidad de la información disponible en función del tipo de estación, resolución de las imágenes satelitales y variabilidad de la misma por factores naturales.

Aunado con lo anterior, con el desarrollo y los resultados del proyecto de investigación, se realizó un comparación cuantitativa y cualitativa enfocada en la calidad de información meteorológica disponible a través de métodos convencionales como lo son estaciones climatológicas y métodos menos comunes como la teledetección, con el objetivo de determinar cuál de los dos métodos influye más al determinar la disponibilidad de agua de una zona de interés en particular o si los dos métodos, se pueden llegar a complementar con el fin de contar con datos más completos y fiables, siempre tomando como referencia los datos proporcionadas por medio directos (en la zona) como lo son las estaciones.

En conclusión, los resultados del estudio “Comparación de un balance hidrológico de la cuenca del Río Checua haciendo uso de métodos tradicionales (estaciones meteorológicas) y de sensores remotos (teledetección), a partir de análisis de sensibilidad”, permito establecer la fuente de información meteorológica más confiable, en función del análisis de sensibilización.

Finalmente, con resultados obtenidos de la investigación, se podrá incentivar el uso de teledetección en Colombia, no solo para fines educativos, siempre y cuando está presente homogeneidad con el resultado obtenido de estaciones meteorológicas.

| Producto esperado de la investigación (Resultado) | Indicador | Población beneficiada |
|--|--|--|
| Incremento del campo de análisis, interpretación y | Tesis de grado con resultados de investigación | Comunidad educativa Gobierno local – Secretaría |

| Producto esperado de la investigación (Resultado) | Indicador | Población beneficiada |
|---|--|---|
| discusión del proceso de implementación de métodos no convencionales (teledetección), con énfasis en el desarrollo de modelos hidrológicos | | de educación Comunidad científica Organizaciones sociales comprometidas con el recurso hídrico. |
| Publicación de un artículo IEEE en la revista de la Universidad Católica (digital) | Artículo elaborado y su publicación. | Comunidad educativa, científica y entidades gubernamentales y sociales comprometidas con el recurso hídrico. |
| Registro de información (bases de datos) y cálculos que contiene guías y modelos aplicadas por comunidad educativa en métodos de elaboración de balances hídricos | Bases de datos y modelos desarrollados | Comunidad educativa Gobierno local – Secretaría de educación Comunidad científica Organizaciones sociales comprometidas con el recurso hídrico. |

Tabla 6. Generación de nuevas aplicaciones tecnológicas para el conocimiento

Fuente: Autores.

7. DESARROLLO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

7.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA.

7.1.1. Morfometría de la Cuenca del Rio Checua

Maidment manifestó que la morfometría es “una de las herramientas más importante en el análisis hídrico es el estudio de las características morfométricas de la cuenca. Esto permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de una región”¹⁰⁰, razón por la cual se hizo necesario caracterizar la cuenca del Rio Checua.

La metodología para determina la morfometría de la cuenca, consistió en la recolección de datos primarios en base al análisis de la información cartográfica descargada de la plataforma de la NASA denominada ASF DATA SEARCH VERTEX del satélite ALOS PALSAR (<https://search.asf.alaska.edu>), de la cual se obtuvo un modelo de elevación digital del terreno (DEM) de la zona de estudio.

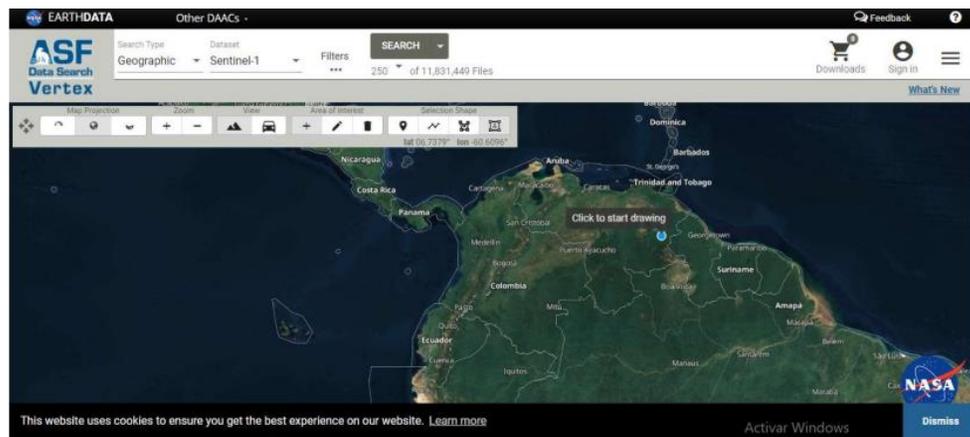


Ilustración 18. Página servidor ASF ALASKA de la NASA.

Fuente: <https://search.asf.alaska.edu>

¹⁰⁰ MAIDMENT David, “Handbook of Hydrology” {En línea} {14 octubre de 2020}. Disponible en: <https://www.iberlibro.com/primer-edicion/Handbook-Hydrology-Maidment-David-R-editor/5467387295/bd>

Para el cálculo de las variables necesarias requeridas para el análisis morfológico, todos los datos fueron manejados y procesados en el programa computacional ArcGIS y las herramientas del SIG (sistemas de información geográfica), con la debida aplicación de las fórmulas de la morfometría.

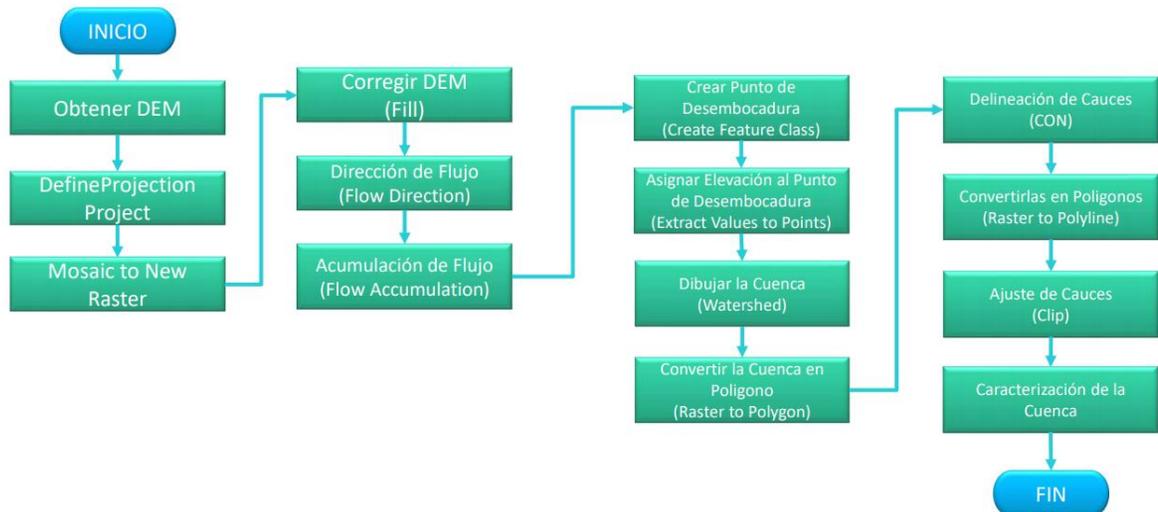


Figura 11. Procedimiento desarrollado en la herramienta computacional ArcGIS para la delimitación de la cuenca del Río Checua.

Fuente: Planificación y manejo integrado de cuencas hidrográficas – Unidad 3.

7.1.1.1. Paso para la delimitación de la cuenca del Río Checua

a) Obtención del DEM de la zona de estudio.

Mediante la plataforma de la NASA denominada ASF DATA SEARCH VERTEX del satélite ALOS PALSAR, se delimitó la zona de estudio teniendo en cuenta los municipios donde se encuentra ubicada la cuenca del Río Checua y sus coordenadas geográficas (ver Tabla 3), con lo cual se generó un polígono que cubriera el área total de esta como se evidencia en la Ilustración 18. Así mismo, se dio clic en el botón buscar, con el fin de desplegar las imágenes satelitales disponibles del satélite seleccionado, escogiendo la imagen que mejor representara la zona de estudio, para finalmente descarga el modelo de elevación digital del

terreno seleccionado con la mejor resolución y que ya estuviera corregido (ver Ilustración 18).

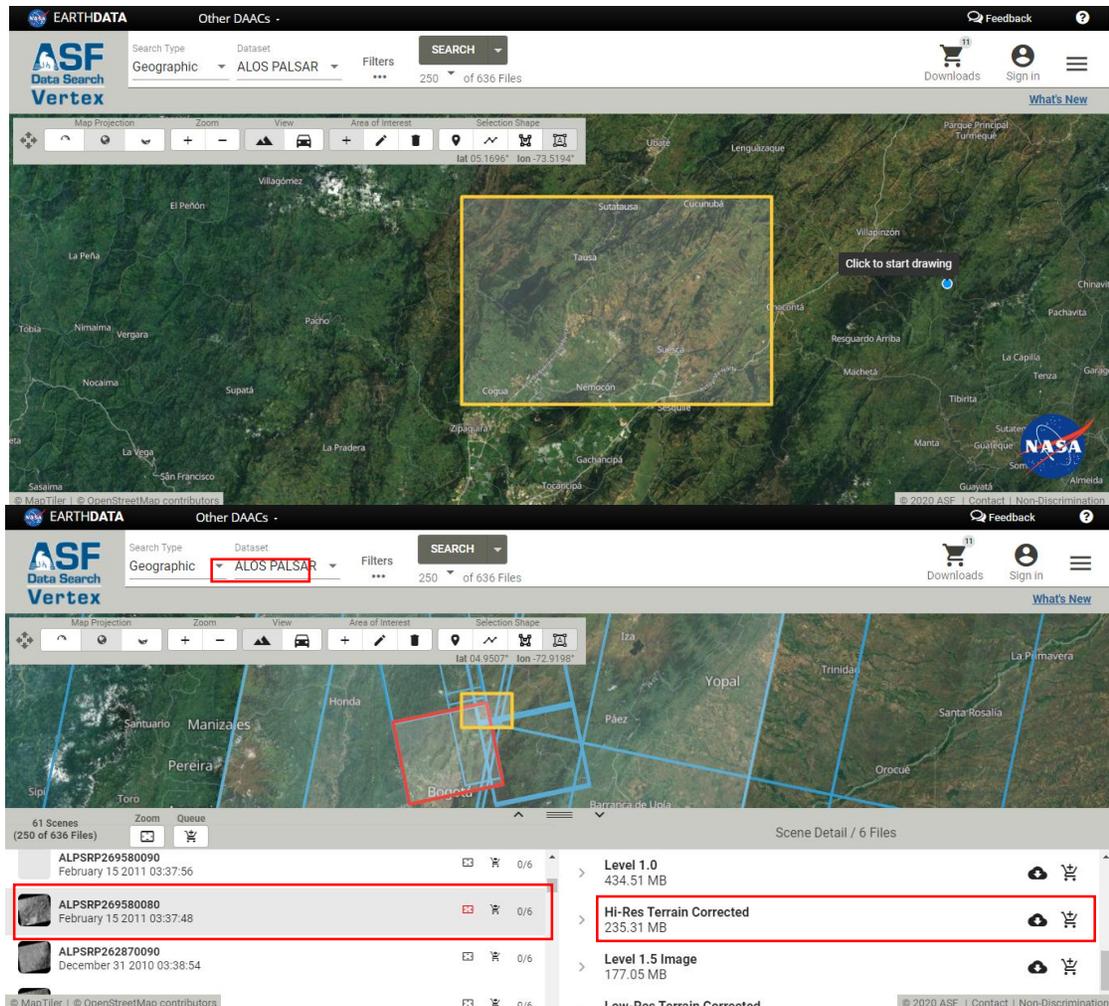


Ilustración 19. Página servidor ASF ALASKA de la NASA.

Fuente: [https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=8.12813912859276¢er=-73.407396,4.186600&dataset=ALOS&polygon=POLYGON\(\(-74.0114%205.0477,-73.6973%205.0477,-73.6973%205.2573,-74.0114%205.2573,-74.0114%205.0477\)\)&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP269580080-KMZ](https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=8.12813912859276¢er=-73.407396,4.186600&dataset=ALOS&polygon=POLYGON((-74.0114%205.0477,-73.6973%205.0477,-73.6973%205.2573,-74.0114%205.2573,-74.0114%205.0477))&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP269580080-KMZ)

b) Desarrollo de la herramienta ArcGIS.

Una vez descargado el modelo de elevación digital del terreno (DEM) de la zona donde se encuentra ubicada la cuenca del Río Checua, se procedió a realizar cada uno de los procesos descritos en la Figura 12 del presente documento, arrojando como resultado la delimitación de la cuenca, con su respectiva red de drenaje y cauce principal.

En el anexo A, se presenta de manera detallada los resultados que se observan en la Tabla 7 y en las Ilustraciones de la 19 a la 30, relacionando la geodatabase desarrollada y generada en el programa ArcGIS. Así mismo, en el Anexo B, se relaciona el respectivo mapa donde se presentan los resultados finales con sus respectivas descripciones.

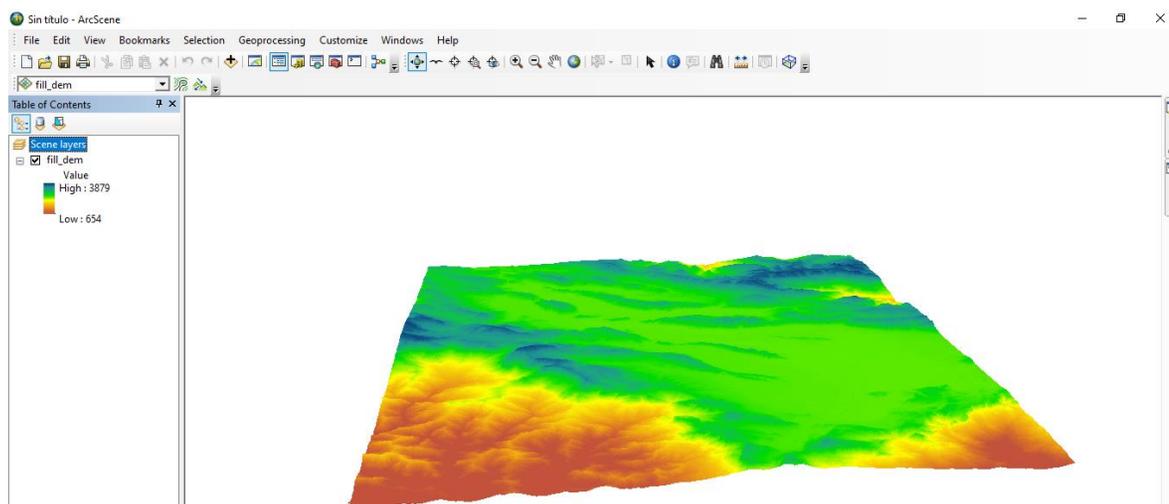


Ilustración 20. Modelo de elevación del terreno (DEM) en 3D de la zona de estudio - ArcGIS.
Fuente: <https://search.asf.alaska.edu>

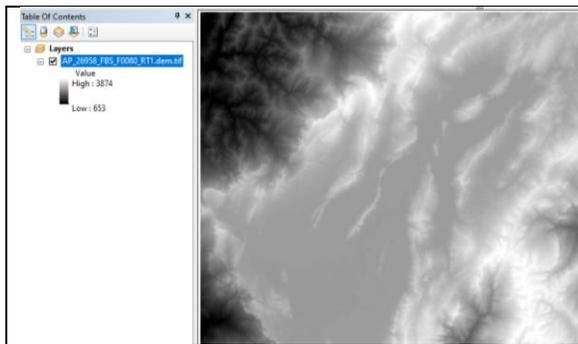


Ilustración 21. Define Project DEM.

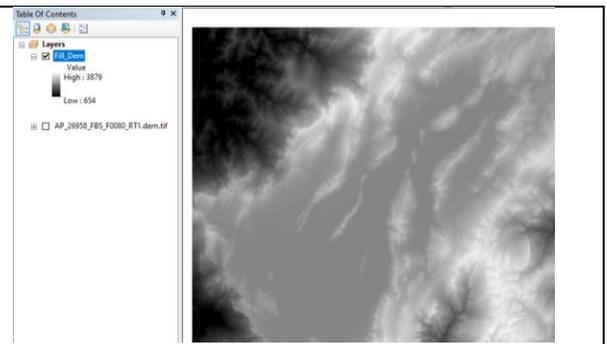


Ilustración 22. Corrección del DEM (Fill).

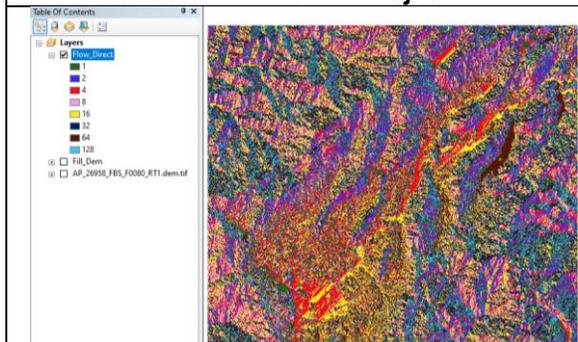


Ilustración 23. Dirección del flujo.

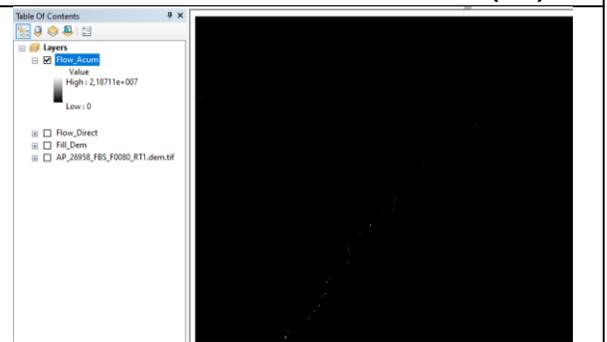


Ilustración 24. Acumulación del flujo.

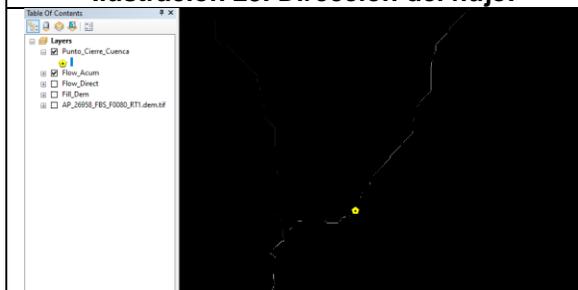


Ilustración 25. Creación punto de cierre de la cuenca (coordenadas geográficas).

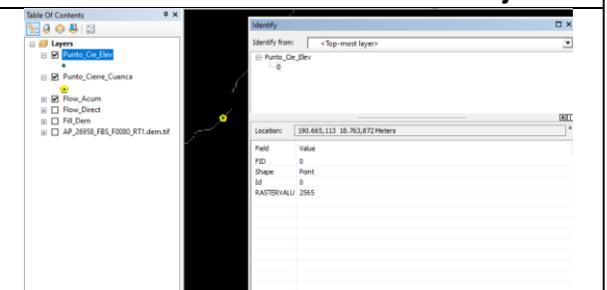


Ilustración 26. Asignación elevación punto de cierre de la cuenca (desembocadura).

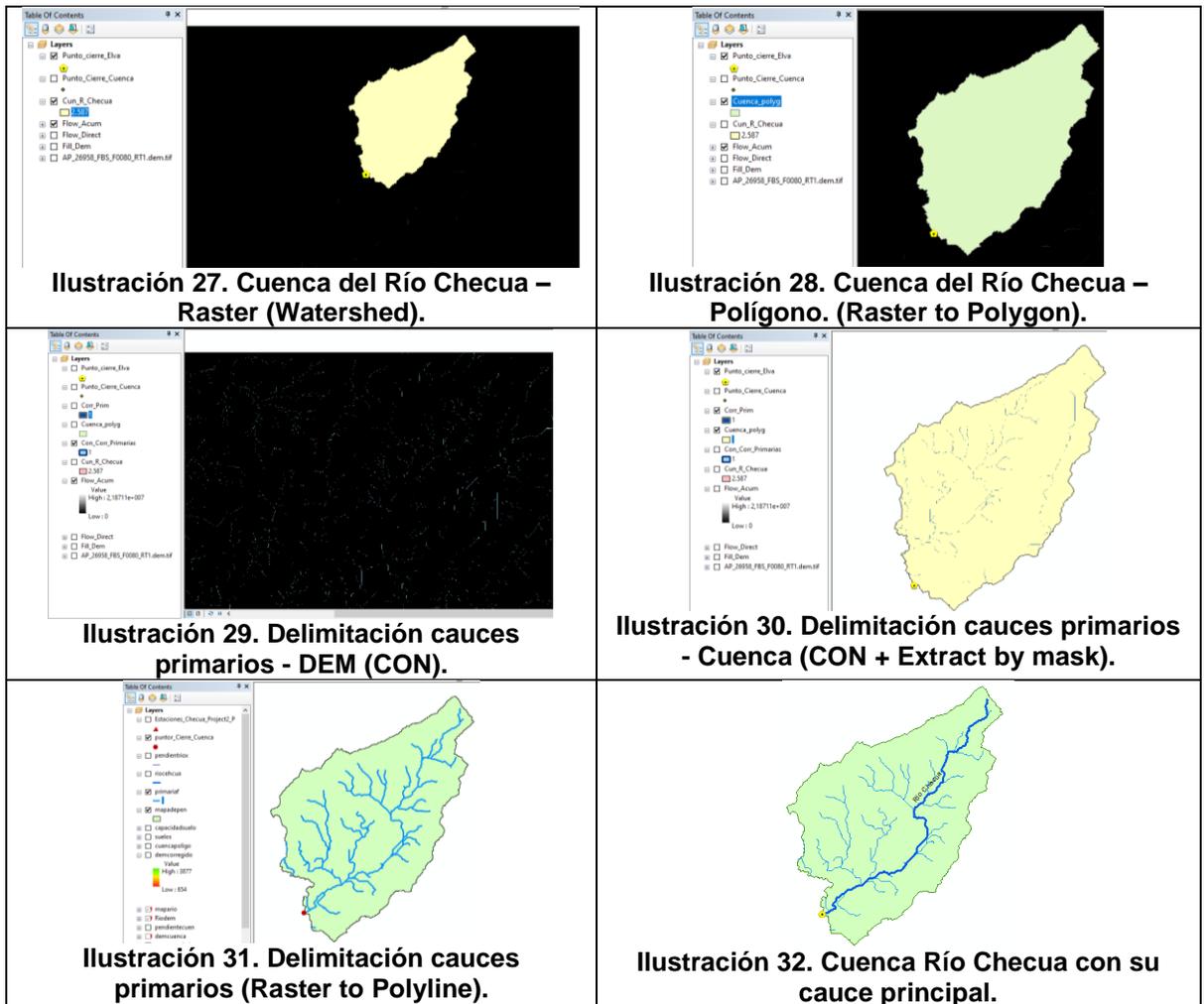


Tabla 7. Procedimiento para la delimitación de la cuenca del Río Checuá a partir de un DEM y la herramienta computacional ArcGIS.

Fuente: Autores.

7.1.1.2. Caracterización de la cuenca del Río Checuá

Desde el punto de vista morfométrico, en la zona de vertiente de la cuenca del Río

Checua predominan las formas de taludes alargados originados por erosión deferencial de los estratos del anticlinal.

Las otras formas de erosión están asociadas con los cauces de aguas superficiales, con la estructura del subsuelo (socavamientos) y con el impacto de la lluvia y la cobertura del suelo (erosión laminar). Por consiguiente, la zona de vertiente, especialmente su parte media, se constituye en zona de erosión y arrastre de materiales, los cuales son depositados en la parte baja (Sabana), siendo ésta la más productiva desde el punto de vista agropecuario, pero con los limitantes de inundaciones y saturación de agua de lluvia por deficiencia de drenaje.

Por la variación de pisos altitudinales entre 2.500 y 3.500 m. se presenta igualmente una variación de condiciones físicas, climáticas y pisos térmicos, a escala de microclimas.

La totalidad de la cueca está localizada entre los 2.550 m. y los 3.500 m. (esta última corresponde a la elevación máxima); el 65% de la superficie se encuentra ubicada entre los 2.550 y 2.900 m

7.1.1.2.1. Área de la cuenca del Río Checua

El área de una de los parámetros más relevantes y necesarios que define la morfometría de la cuenca, la cual se clasifica de la siguiente manera.

| Área (km²) | Nombre |
|------------------------------|---------------|
| < 5 | Unidad |
| 5 – 20 | Sector |
| 20 - 100 | Microcuenca |
| 100 – 300 | Subcuenca |
| > 300 | Cuenca |

Tabla 8. Clasificación de áreas.

Fuente: JIMÉNEZ, Materón. 1986

Una vez realizado la delimitación de las zonas de interés hídrico, se determinó la superficie de la cuenca mediante el programa computacional ArcGIS a partir de un modelo digital de elevación del terreno (DEM), con el fin de obtener el área de la cuenca aguas arriba del punto de drenaje, así mismo, con la ayuda del geoprocésamiento de datos se determinó un área total de 17.015 hectáreas equivalentes a 170,15 Km² que aportan aguas superficiales en los periodos lluviosos y de infiltración acumulada para los periodos secos.

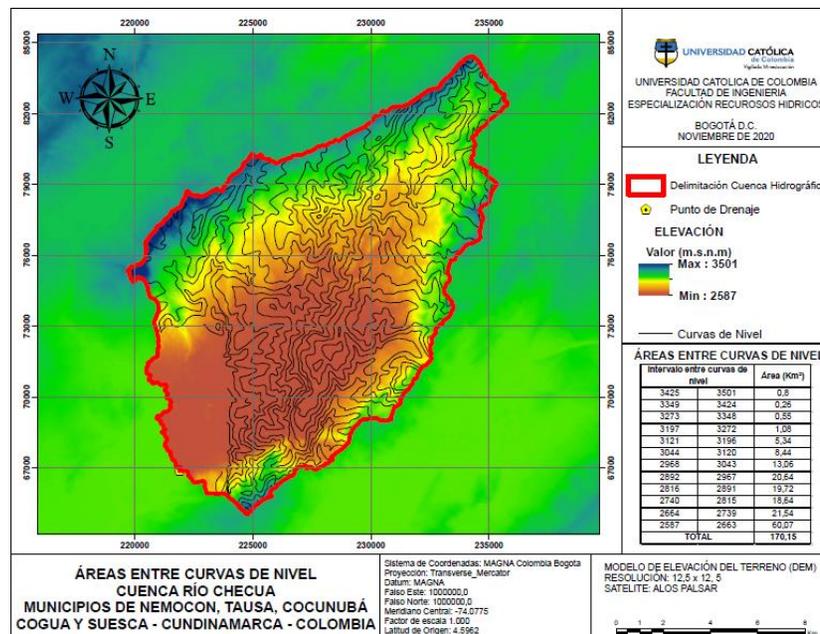


Ilustración 33. Delimitación de la cuenca Río Checua con el procesamiento de un DEM en el programa ArcGIS y de herramientas SIG.

Fuente: Autores.

En el anexo B “B-1_Delimitación_Cuenca_Rio_Checua”, se presenta el mapa resultante del desarrollo del proceso descrito en la Figura 12.

7.1.1.2.2. Perímetro de la cuenca del Río Checua

El perímetro es otro de los parámetros morfométricos fundamentales para inferir la

forma de la cuenca; para la cuenca del Río Checua por medio del programa ArcGIS y herramientas SIG, se determinó un perímetro de 60,05 Km, siguiendo la línea divisoria de aguas.

| FID | Shape * | Id | gridcode | Area Km2 | Area Ha | Perimet km |
|-----|---------|----|----------|-----------|--------------|------------|
| 0 | Polygon | 1 | 2587 | 170,14719 | 17014,719016 | 66,050939 |

Ilustración 34. Resultados del Área y Perímetro de la cuenca del Río Checua por medio del programa ArcGIS.

Fuente: Autores.

7.1.1.2.3. Índice de compacidad o índice de Gravelius (K_c)

El índice de compacidad o de Gravelius permite determinar la forma de la cuenca, relacionando el perímetro de esta con el área de un círculo equivalente, para lo cual, cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad.

| CLASE | RANGO | RANGO |
|-------|------------|------------------------------------|
| Kc1 | 1-1.25 | Redonda – oval redonda |
| Kc2 | 1.25 – 1.5 | Oval redonda – Oval oblonga |
| Kc3 | 1.5 – 1.75 | Oval oblonga – rectangular oblonga |

Tabla 9. Índice de Gravelius (K_c)

Fuente: GONZÁLES DE MATAUCO, Askoa. Universidad del País Vasco 2004.

Para determinar la forma de la cuenca, se utilizó el índice de compacidad o índice de Gravelius.

$$K_c = 0.28 \times \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right) \text{ o } K_c = 0.282 \times \left(\frac{P}{A^{0.5}}\right) \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

K_c : coeficiente de Gravelius

P : perímetro de la cuenca (km)

A : área de la cuenca (km²)

$$K_c = 0.282 \times \left(\frac{170,15 \text{ Km}}{(60,05 \text{ Km})^{0.5}} \right) = 1,298$$

De acuerdo con el K_c obtenido (1,298) y la tabla 9 del presente documento, se determina que la cuenca es de clase **Kc2**, toda vez el rango del coeficiente de compacidad se encuentra ente los rangos 1,25 y 1,5, razón por la cual se considera una cuenca de forma oval redonda – oval oblonga. En la Ilustración 34 se puede corroborar los resultados obtenidos a través de los cálculos.

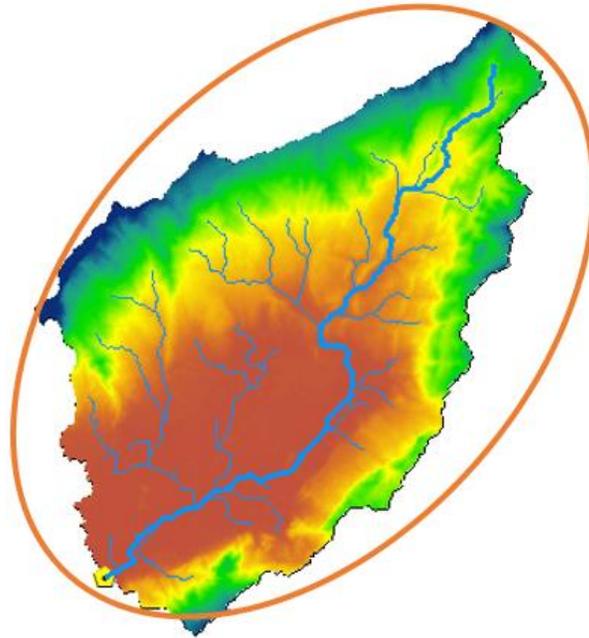


Ilustración 35. Forma de la cuenca de acuerdo con el trazado en ArcGIS.

Fuente: Autores

Conforme con lo anterior, este índice de compacidad calculado permite determinar que la cuenca es diferente a un círculo, razón por la cual la cuenca no presentara mayor tendencia a crecientes o concentración de altos volúmenes de escorrentía, toda vez que por su forma tienden a escurrirse mayor al punto de salida

7.1.1.2.4. Factor de forma

Este factor permite la relación entre el área (A) de la cuenca y el cuadrado de la longitud axial (máxima) de la cuenca (L_m), con este se mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas, así mismo denota la forma redondeada o alargada de la cuenca.

| f | Forma |
|----------|-----------------------|
| < 1 | Tiende a ser alargada |
| 1 | Cuadra |
| > 1 | Tiende a ser cuadrada |

Tabla 10. Clasificación de la cuenca de acuerdo al factor de forma (K_f)

Fuente: GONZÁLES DE MATAUCO, Askoa. Universidad del País Vasco 2004.

Para determinar la forma de la cuenca, se utilizó la siguiente ecuación

$$K_f = \frac{A}{L_m^2} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

K_f : factor de forma

A: área de la cuenca (km^2)

L_m : Longitud axial máxima de la cuenca (km)

Para determinar la longitud axial máxima de la cuenca (L_m), se utilizó la herramienta "Measure" de ArcGIS, con la cual se obtuvo un valor de 21,50 kilómetros (21.505 metros).

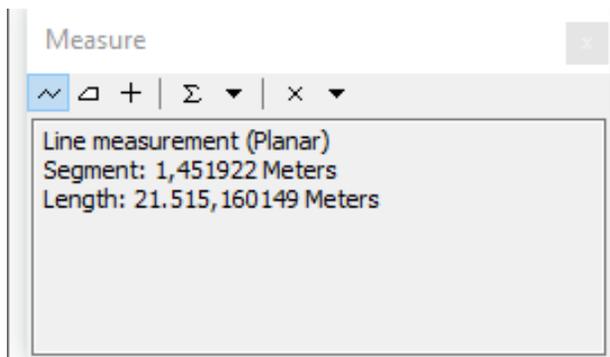


Ilustración 36. Procedimiento para calcular la longitud axial máxima de la cuenca del Río Checua de acuerdo con el trazado en ArcGIS.

Fuente: Autores.

$$K_f = \frac{170,15 \text{ km}^2}{(21,50 \text{ km})^2} = 0,368$$

De acuerdo con el valor obtenido del factor de forma (0,368) y las clasificaciones de forma descritas en la Tabla 10, se determina que la cuenca objeto de estudio presenta una forma alargada, toda vez que su factor de forma es <1 y tiende a 0. Esta información se puede corroborar con la Ilustración 34.

Adicionalmente, al determinar que el factor de forma de la cuenca del Río Checua tiende a 0 ($0,368 < 1$), razón por la cual se establece que la dinámica de la escorrentía superficial de la cuenca presenta un flujo de agua más veloz en comparación con cuencas con formas redondas, lo que permite una evacuación más rápida generado mayor energía cinética en el arrastre de sedimentos.

Finalmente, en la cuenca de estudio de acuerdo con su forma alargada, no cuenta con achatamientos, y por consiguiente no se presentará concentraciones por escurrimiento de lluvias ni crecidas.

7.1.1.2.5. Índice de alargamiento

Este índice permite la relación entre la longitud axial (máxima) de la cuenca (L_m) y

el ancho máximo (A_m) de la cuenca, es decir la distancia desde la salida de la cuenca hasta el punto más alejado y el ancho máximo perpendicular a esta distancia.

| I_a | Clasificación |
|---------|----------------------------|
| $> 1,0$ | Cuenca a alargada |
| $= 1$ | Cuenca cuadrada o circular |
| $< 1,0$ | Cuenca achatada |

Tabla 11. Clasificación de la cuenca de acuerdo al índice de alargamiento (I_a)

Fuente: GONZÁLES DE MATAUCO, Askoa. Universidad del País Vasco 2004.

Para determinar el índice de alargamiento de la cuenca, se utilizó la siguiente ecuación:

$$I_a = \frac{L_m}{A_m} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

I_a : Índice de alargamiento

L_m : Longitud axial máxima de la cuenca (km)

A_m : Ancho máximo de la cuenca (km)

Para determinar el ancho máximo de la cuenca (A_m), se utilizó la siguiente ecuación matemática:

$$A_m = \frac{A_c}{L_m} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$A_m = 170,15 \text{ km} \cdot 221,50 \text{ km} = 7,91 \text{ km}$$

Finalmente, una vez determinado el ancho máximo de la cuenca (A_m), se procedió a calcular el índice de alargamiento.

$$I_a = \frac{21,50 \text{ km}}{7,91 \text{ km}} = 2,72$$

Con forme con lo anterior, el índice de alargamiento es el equivalente a 2,72 valor que confirma el alargamiento de la cuenca.

7.1.1.2.6. Elevación o altura media de la cuenca (curva hipsométrica)

La elevación de una cuenca hidrográfica incide directamente sobre el clima de esta, y, por tanto, sobre el régimen hidrológico, además brinda una base para caracterizar zonas climatológicas diferentes dentro de la misma cuenca. Así mismo, es importante por la influencia que ejerce sobre la precipitación, sobre las pérdidas de agua por evaporación y transpiración y, consecuentemente sobre el caudal medio.

En la cuenca del Río Checua se presenta las siguientes alturas, las cuales fueron determinadas por medio del modelo de elevación del terreno (DEM) del área de estudio, y el procesamiento de este a través de la herramienta computacional ArcGIS (ver Ilustración 36).

Altitudes de la cuenca del Río Checua:

- Cota Superior 3.501 m.s.n.m.
- Cota Inferior 2.587 m.s.n.m.
- Elevación media 2.784,40 m.s.n.m.

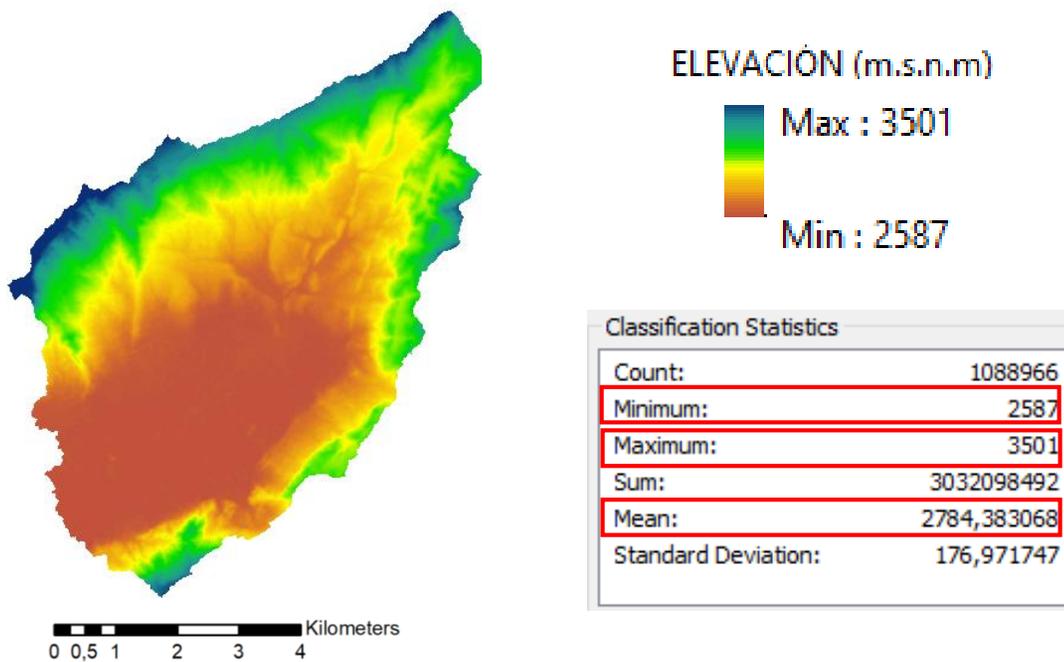


Ilustración 37. Altura media de la cuenca del Río Checua determinada por medio del programa ArcGIS.

Fuente: Autores.

Conforme con lo anterior, la altitud media de la cuenca se determinó también mediante la curva hipsométrica de esta, la cual relaciona la altitud con el área, y representa gráficamente la variación de la elevación de una cuenca, en la cual se puede observar la distribución de las zonas altas, medias y bajas.

Para la determinación de la curva hipsométrica de la cuenca de Río Checua, se obtuvieron los datos de alturas y áreas entre curvas de nivel por medio del programa ArcGIS, resultados que se presentan en la Ilustración 37.

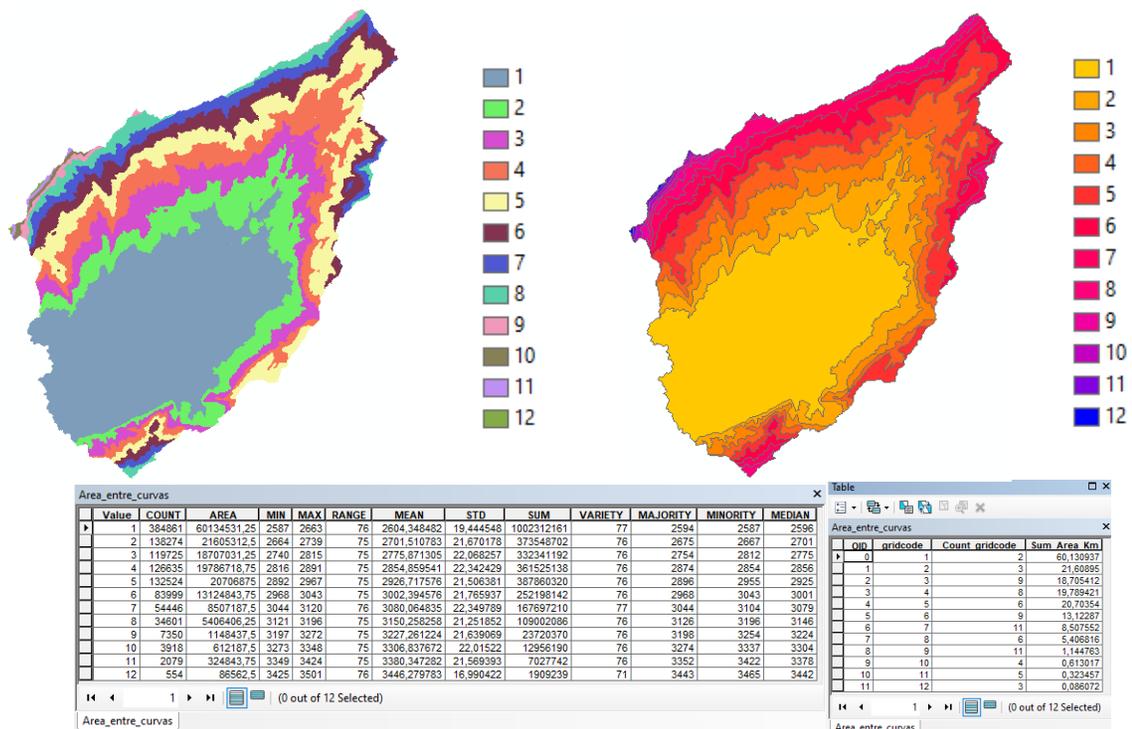


Ilustración 38. Alturas y áreas entre curvas de la cuenca del Río Checua determinadas por el DEM de la zona de estudio y convertidas a polígono (SHAPE).

Fuente: Autores.

Ahora bien, teniendo en cuenta la información reportada en los mapas de curvas de nivel y elevaciones dentro del área de la cuenca de la Ilustración 37, se procedió a organizar la información necesaria para el cálculo de la elevación media.

| No. | Cota (msnm) | | | Área (km ²) | | | |
|-----|-------------|--------|----------|-------------------------|-----------|-------------|--------------|
| | Mínimo | Máximo | Promedio | Intervalo | Acumulado | % Acumulado | % Intermedio |
| 1 | 2587 | 2663 | 2625 | 60,07 | 170,15 | 100,00 | 35,30 |
| 2 | 2664 | 2739 | 2701,5 | 21,54 | 110,08 | 64,70 | 12,66 |
| 3 | 2740 | 2815 | 2777,5 | 18,64 | 88,54 | 52,04 | 10,96 |
| 4 | 2816 | 2891 | 2853,5 | 19,72 | 69,90 | 41,08 | 11,59 |
| 5 | 2892 | 2967 | 2929,5 | 20,64 | 50,18 | 29,49 | 12,13 |

| No. | Cota (msnm) | | | Área (km ²) | | | |
|-----|-------------|--------|----------|-------------------------|-----------|-------------|--------------|
| | Mínimo | Máximo | Promedio | Intervalo | Acumulado | % Acumulado | % Intermedio |
| 6 | 2968 | 3043 | 3005,5 | 13,06 | 29,54 | 17,36 | 7,68 |
| 7 | 3044 | 3120 | 3082 | 8,44 | 16,48 | 9,68 | 4,96 |
| 8 | 3121 | 3196 | 3158,5 | 5,34 | 8,04 | 4,72 | 3,14 |
| 9 | 3197 | 3272 | 3234,5 | 1,08 | 2,70 | 1,58 | 0,64 |
| 10 | 3273 | 3348 | 3310,5 | 0,55 | 1,61 | 0,95 | 0,32 |
| 11 | 3349 | 3424 | 3386,5 | 0,26 | 1,06 | 0,63 | 0,15 |
| 12 | 3425 | 3501 | 3463 | 0,80 | 0,80 | 0,47 | 0,47 |

Tabla 12. Resumen de alturas y áreas entre curvas de la cuenca del Río Checua.

Fuente: Fuente: Autores.

Posteriormente, a través del programa computacional Excel se elaboró la curva hipsométrica de la siguiente manera:

- Se marcaron sub-áreas de la cuenca, siguiendo las curvas de nivel, para este caso las áreas estuvieron cada 76 metros.
- Para determinar las áreas parciales se utilizó el programa computacional ArcGIS, seguidamente se determinó las áreas acumuladas del sitio.
- Con los datos de porcentaje de área acumulada en el eje de las X y con las alturas medias en el eje de las Y, se procede a graficar la tendencia de la curva hipsométrica.

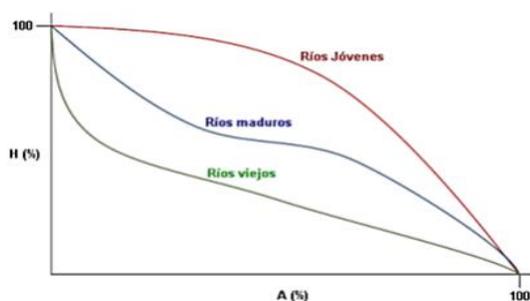
Finalmente, se contó con los datos necesarios para realizar el cálculo de la altura media de la cuenca del Río Checua y la construcción de la curva hipsométrica de esta.

| Intervalo entre curvas de nivel | | E _i (m) | A _i (Km ²) | E _i X A _i | % Área (Km ²) | Curva Hipsométrica | |
|---------------------------------|------|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------|
| | | | | | | % A _{acum.} | Elevación (m) |
| 3425 | 3501 | 3463 | 0,80 | 2772,48 | 0,58 | 0,58 | 3463 |
| 3349 | 3424 | 3387 | 0,26 | 892,68 | 0,19 | 0,77 | 3387 |
| 3273 | 3348 | 3311 | 0,55 | 1822,76 | 0,38 | 1,15 | 3311 |
| 3197 | 3272 | 3235 | 1,08 | 3495,20 | 0,74 | 1,89 | 3235 |
| 3121 | 3196 | 3159 | 5,34 | 16868,29 | 3,55 | 5,44 | 3159 |

| Intervalo entre curvas de nivel | | Ei (m) | Ai (Km ²) | Ei X Ai | % Área (Km ²) | Curva Hipsométrica | |
|---------------------------------|------|---|-----------------------|------------------|---------------------------|----------------------|---------------|
| | | | | | | % A _{acum.} | Elevación (m) |
| 3044 | 3120 | 3082 | 8,44 | 26013,93 | 5,47 | 10,91 | 3082 |
| 2968 | 3043 | 3006 | 13,06 | 39253,63 | 8,26 | 19,16 | 3006 |
| 2892 | 2967 | 2930 | 20,64 | 60466,64 | 12,72 | 31,88 | 2930 |
| 2816 | 2891 | 2854 | 19,72 | 56272,73 | 11,83 | 43,71 | 2854 |
| 2740 | 2815 | 2778 | 18,64 | 51774,27 | 10,89 | 54,60 | 2778 |
| 2664 | 2739 | 2702 | 21,54 | 58191,93 | 12,24 | 66,84 | 2702 |
| 2587 | 2663 | 2625 | 60,07 | 157685,33 | 33,16 | 100,00 | 2625 |
| | | Sumatoria | 170,15 | 475509,86 | 100,00 | | |
| | | Elevación media de la cuenca (m) | | | 2794,65 | | |

Tabla 13. Cálculo de la elevación media por el método de las franjas de área

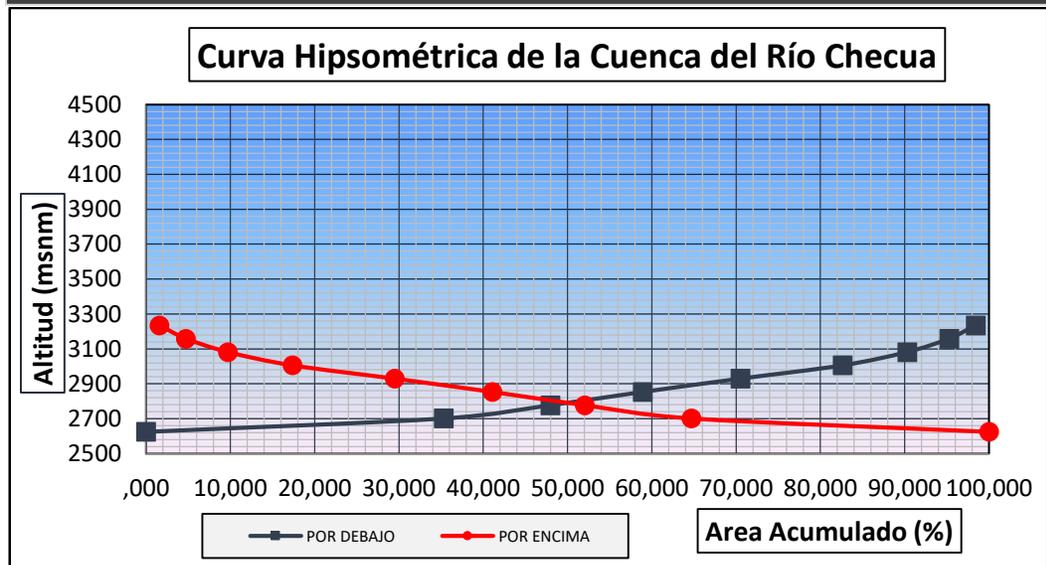
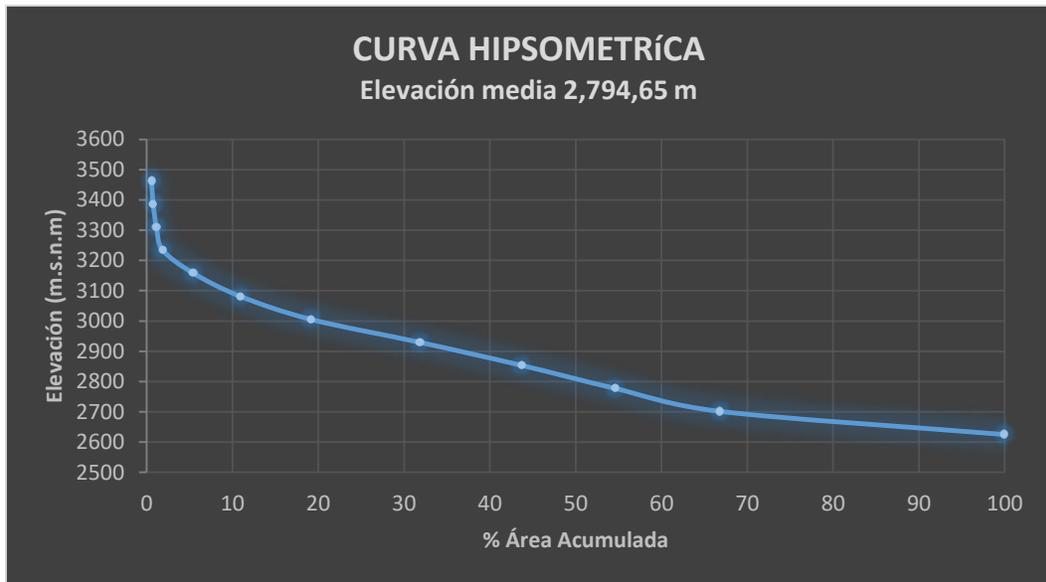
Fuente: Fuente: Autores.



Con la gráfica de la curva hipsométrica, se logró representar el porcentaje de área acumulada que es igualado o excedido a una determinada cota de la cuenca, así como la edad del Río Checua, el cual es clasificado como un río viejo, de acuerdo con la Gráfica 1 del presente documento.

Gráfica 1. Clasificación de los ríos de acuerdo con la curva hipsométrica

Fuente: POMCA. Planes y Programas/Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográfica. CVC – 2017.



Gráfica 2. Curva hipsométrica de la cuenca del Río Checua.
Fuente: Fuente: Autores.

En forma alternativa la elevación media se puede encontrar mediante la

construcción de la curva hipsométrica, donde se lee la elevación para el 50% del valor área. Para la cuenca de estudio el valor de la elevación media determinada a través del programa computacional ArcGIS fue de 2.784,38 m.s.n.m., y por medio de la curva hipsométrica de 2.794,65, razón por la cual se determina que la elevación media del Río Checua es de 2.789,51 m.s.n.m.

7.1.1.2.7. Pendiente media de la cuenca

La pendiente de una cuenca es la variación de la inclinación de esta, su cálculo es importante para definir el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de las capas del suelo (erosión o sedimentos), puesto que, en zonas de altas pendientes, se presenta con mayor frecuencia los problemas de erosión mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación.

Adicionalmente, de acuerdo con el uso del suelo y la red de drenaje, la pendiente influye en el comportamiento de la cuenca afectando directamente el escurrimiento de las aguas lluvias; esta característica controla en buena parte la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta, por lo tanto, el tiempo que lleve el agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de la cuenca, es decir el tiempo de viaje.

En cuencas de pendientes fuertes existe la tendencia a la generación de crecientes en los ríos en tiempos relativamente cortos; estas cuencas se conocen como torrenciales, igual que los ríos que las drenan. En la Tabla 14 se relacionan las clasificaciones de las cuencas según la pendiente.

| Pendiente Media (%) | Tipo de relieve |
|----------------------------|-----------------------------|
| 0 – 3 | Plano |
| 3 – 7 | Suave |
| 7 – 12 | Medianamente Accidentado |
| 12 – 20 | Accidentado |
| 20 – 35 | Fuertemente Accidentado |
| 35 – 50 | Muy Fuertemente accidentado |

| Pendiente Media (%) | Tipo de relieve |
|---------------------|-----------------|
| 50 – 75 | Escarpado |
| > 75 | Muy escarpado |

Tabla 14. Clasificación de las cuencas de acuerdo a su pendiente media

Fuente: Reyes Barroso y Carvajal. Universidad del Valle 2010.

Ahora bien, en la cuenca del Río Checua se presenta las siguientes pendientes, las cuales fueron determinadas por medio del modelo de elevación del terreno (DEM) del área de estudio, y el procesamiento de este a través de la herramienta computacional ArcGIS (ver Ilustración 38).

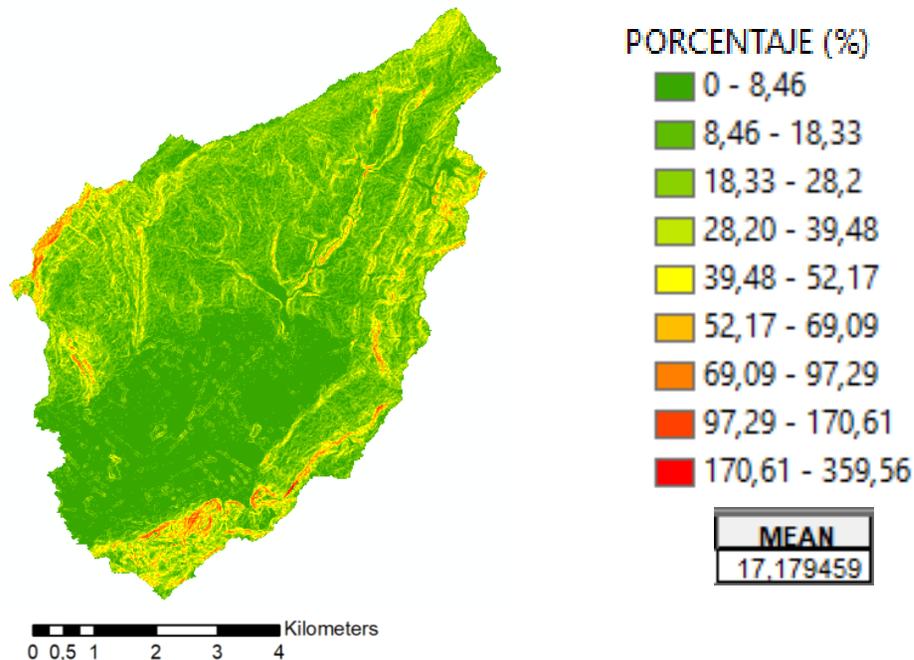


Ilustración 39. Pendiente media de la cuenca del Río Checua determinada por medio del programa ArcGIS.

Fuente: Autores.

Conforme con lo anterior, la pendiente media la cuenca del Río Checua determinada por medio del programa ArcGIS es de 17,18%.

Ahora bien, con el fin de corroborar la pendiente media de la cuenca del Río Checua determinada a través del programa computacional ArcGIS, se procedió a calcular la pendiente media por medio de la siguiente ecuación matemática:

$$P_m = \frac{H_1 \times L_{m1} + H_2 \times L_{m2} + \dots + H_n \times L_{mn}}{\sum A} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

H: Diferencia de altura entre curvas

L_m: Longitud de la curva de nivel

$\sum A$: Área total de la cuenca

Para determinar los datos de las diferencias entre las alturas y las longitudes de las curvas de nivel, se realizó por medio del programa ArcGIS, resultados consolidados en la Tabla 15.

| CALCULO PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA | | | | |
|---|------|--------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Intervalo entre curvas de nivel (m) | | Cota Media del Intervalo | Área (Km ²) | Longitud Curva de Nivel (Km) |
| 2587 | 2600 | 13 | 78,72 | 0,00 |
| 2600 | 2800 | 200 | 41,12 | 47,90 |
| 2800 | 3000 | 200 | 31,82 | 60,20 |
| 3000 | 3200 | 200 | 16,52 | 37,50 |
| 3200 | 3400 | 200 | 1,01 | 7,70 |
| 3400 | 3501 | 101 | 0,93 | 0,82 |
| Sumatoria | | | 170,15 | 154,12 |
| Pendiente media de la cuenca | | | 180,680694 | m/m |
| | | | 0,18068069 | km/m |
| | | | 18,07 | % |

Tabla 15. Calculo de la pendiente media de la cuenca del Río Checua.

Fuente: Autores.

Aunado con lo anterior, para la cuenca de estudio el valor de la pendiente media determinada a través del programa computacional ArcGIS fue de 17,17%, y por medio de la ecuación matemática y el programa computacional Excel de 18,07, razón por la cual se determina que la pendiente media de la cuenca del Río Checua es de 17,62%, con la cual se evidencia un tipo de relieve accidentado conforme con lo establecido en la Tabla 14 del presente proyecto de investigación.

En el anexo B “B-2_Mapa_Pendiente_Media_de_la_Cuenca”, se presenta de manera detallada el mapa de las pendientes de la cuenca del Río Checua.

Los cálculos de la morfometría de la cuenca del Río Checua, son relacionados de manera detallada en el documento tipo Excel denominado “Anexo_C_Calculos_Morfometría”. Así mismo, en el Anexo_A_SHP se relaciona los respectivos SHP y DEM para la elaboración de los anexos B.

Finalmente, como resumen de la morfometría de la cuenca del Río Checua, se puede concluir que en la zona de vertiente de la cuenca predominan las formas de taludes alargados originados por erosión diferencial de los estratos del anticlinal.

Las otras formas de erosión están asociadas con los cauces de aguas superficiales, con la estructura del subsuelo (socavamientos) y con el impacto de la lluvia y la cobertura del suelo (erosión laminar). Por consiguiente, la zona de vertiente, especialmente su parte media, se constituye en zona de erosión y arrastre de materiales, los cuales son depositados en la parte baja (sabana), siendo ésta la más productiva desde el punto de vista agropecuario, pero con los limitantes de inundaciones y saturación de agua de lluvia por deficiencia de drenaje¹⁰¹.

Por la variación de pisos altitudinales entre 2.500 y 3.501 m. se presenta igualmente una variación de condiciones físicas, climáticas y pisos térmicos, a escala de microclimas.

¹⁰¹ MONSALVE S. Germán. Hidrología en la Ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, primera edición, Bogotá 1.995.

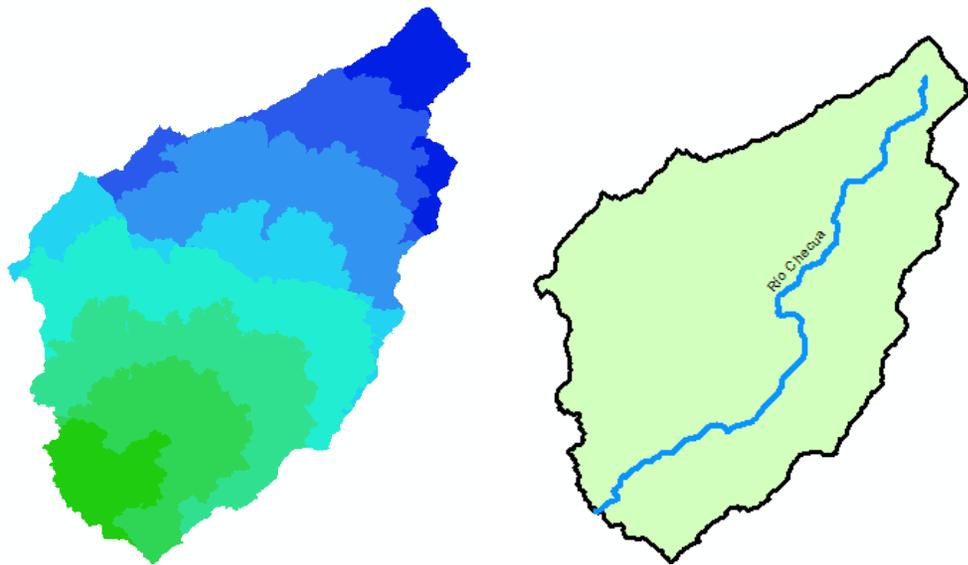
7.1.2. Características del sistema de drenaje de la Cuenca del Río Checua

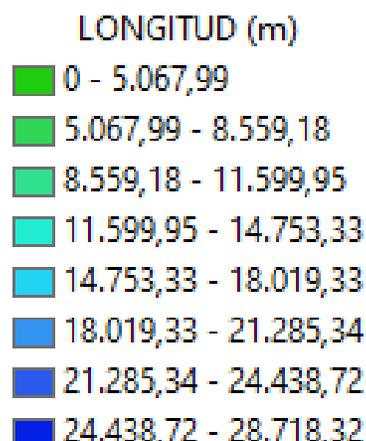
7.1.2.1.1. Longitud del cauce principal

Esta característica es medida desde el punto de concentración hasta el tramo de mayor longitud de este, la cual tiene relación con los caudales medios, máximos y mínimos, toda vez que estos son proporcionales a la longitud de los cauces.

Mediante el programa ArcGIS se determina la longitud del cauce principal de la cuenca del Río Checua, desde el punto de cierre hasta su desembocadura, la cual es de 26,53 kilómetros.

En la Ilustración 41, se presenta un mapa de colores con su respectiva clasificación el cual nos permite evidenciar la distancia desde el punto más alejado hasta el punto de salida, donde los colores más azules reportan la salida del flujo, y la distancia desde su origen se reporta en kilómetros.





| Table | |
|---------------|--------------|
| Rio_Checua | |
| Longitud (km) | Longitud (m) |
| 26,532951 | 26532,950904 |

Ilustración 40. Resultado de la longitud del cauce principal de la cuenca del Río Checua por medio del programa ArcGIS.

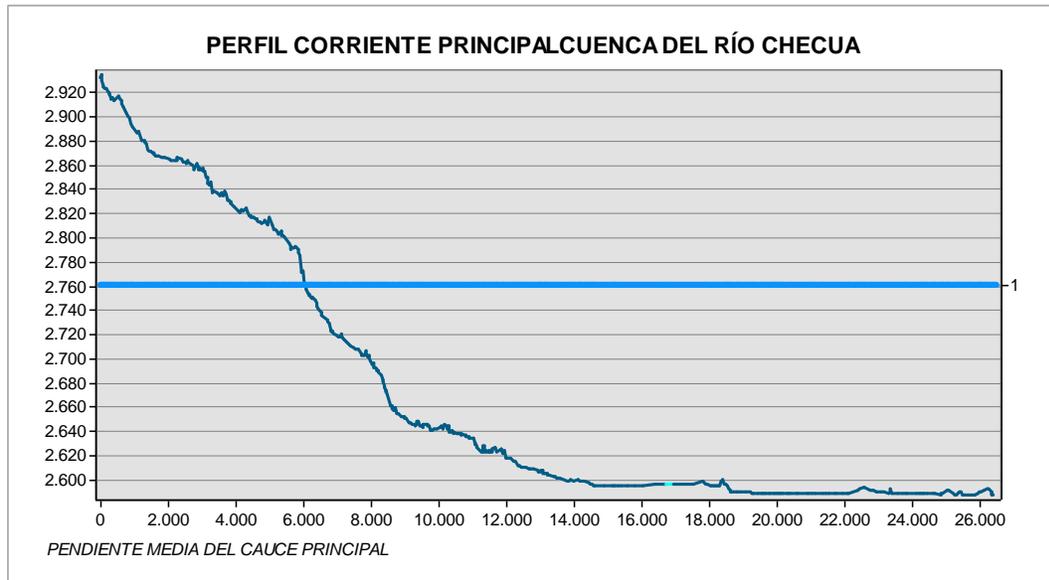
Fuente: Autores.

En el anexo B “B-3_Delimitación_y_Longitud_Cauce_Principal”, se presenta de manera detallada el mapa de la caracterización de la identificación y longitud del cauce principal de la cuenca del Río Checua.

7.1.2.1.2. Pendiente media del cauce principal

La pendiente del cauce de una cuenca incide en la capacidad de transporte de sedimentos, así mismo, la velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua depende de la pendiente de sus canales fluviales. A mayor pendiente mayor velocidad.

Por medio del programa computacional ArcGIS, se obtuvo el perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del Río Checua (ver Gráfica 3), el cual fue el insumo para calcular la pendiente media del cauce principal, por medio del programa computacional Excel, empenado el metodo de Taylos y Schwarz (ver Tabla 15).

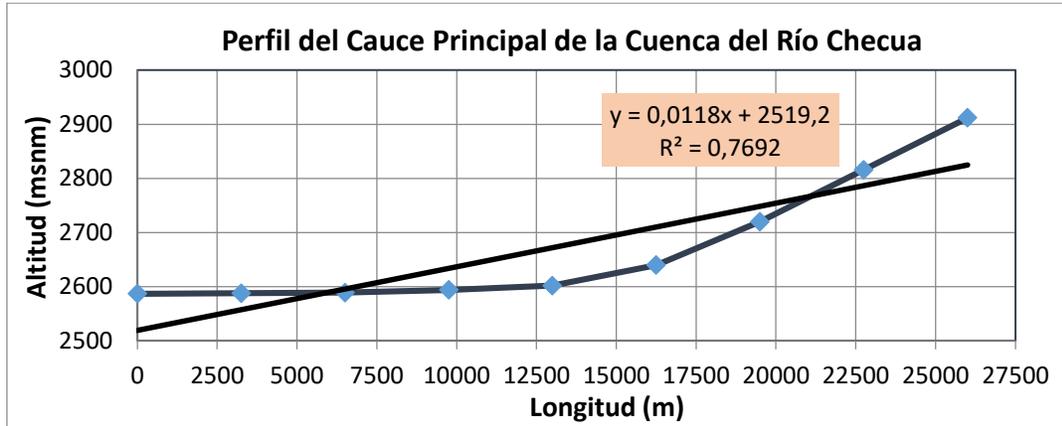


Gráfica 3. Perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del Río Checua.
Fuente: Autores.

| No. Intervalos | Progresiva | Longitud (m) | Longitud Acumulada (m) | Cota | Desnivel | S | 1/(S)^0.5 | | |
|---|------------|--------------|------------------------|------|----------|------------------|-----------|---------------|---|
| 0 | 0+000 | 0,00 | 0,00 | 2587 | | | | | |
| 1 | 3+250 | 3250 | 3250 | 2588 | 1,00 | 0,0004 | 50,8724 | | |
| 2 | 6+500 | 3250 | 6500 | 2589 | 1,00 | 0,0004 | 50,8822 | | |
| 3 | 9+750 | 3250 | 9750 | 2594 | 5,00 | 0,0019 | 22,7772 | | |
| 4 | 13+000 | 3250 | 13000 | 2602 | 8,00 | 0,0031 | 18,0347 | | |
| 5 | 16+250 | 3250 | 16250 | 2640 | 38,00 | 0,0144 | 8,3351 | | |
| 6 | 19+500 | 3250 | 19500 | 2720 | 80,00 | 0,0294 | 5,8310 | | |
| 7 | 22+750 | 3250 | 22750 | 2816 | 96,00 | 0,0341 | 5,4160 | | |
| 8 | 26+000 | 3250 | 26000 | 2912 | 96,00 | 0,0330 | 5,5076 | | |
| $S = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$ Ecuación (15) | | | | | | Sumatoria | | 167,6561 | |
| | | | | | | S = | | 0,0023 | |
| | | | | | | S = | | 0,23 | % |
| (Según Taylor y Schwarz) | | | | | | | | | |

Tabla 16. Calculo de la pendiente media del cauce principal.
Fuente: Autores.

La pendiente del río principal en su primer kilómetro es bastante acentuada (25%) para luego disminuir a los 12 kilómetros en 2.86% y en los 14 kilómetros restantes tiene una pendiente mínima de 0.23%.



Gráfica 4. Perfil del cauce principal de la cuenca del Río Checua

Fuente: Autores.

7.1.2.1.3. Orden de Drenaje

El número de orden de drenaje de una cuenca, es considera como una clasificación que se les da a los diferentes cauces y que toman un determinado valor de acuerdo con el grado de bifurcación.

De acuerdo con la configuración de sus cauces obtenidos a partir del programa computacional ArcGIS, la cuenca del Río Checua es de orden 4, como se puede observar en la Ilustración 41.

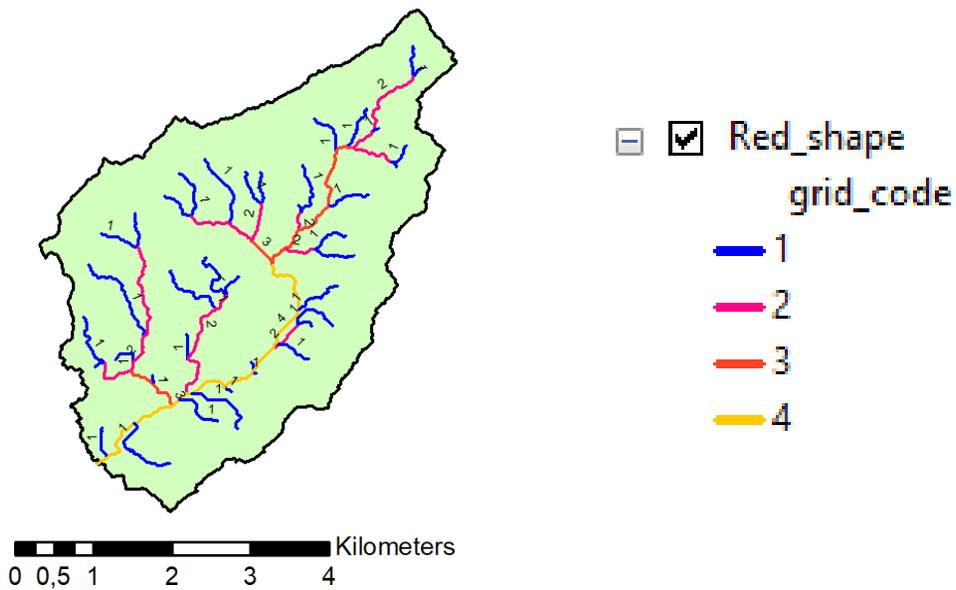


Ilustración 41. Red de drenajes de la cuenca del Río Checua, realizadas por medio Sistemas de Información Geográfica – SIC (ArcGIS).

La representación detallada de la red de drenaje como su número de orden y características morfométricas e hidrológicas de la cuenca del Río Checua, se presentan en el anexo B “B-4_Mapa_Hidrológico_de_la_Cuenca”.

7.1.2.1.4. Densidad de Drenaje

Es considerado un índice de gran importancia, ya que permite conocer la influencia de la geología, topografía, suelos y vegetación, en la cuenca hidrográfica, y está relacionado con el tiempo de salida del escurrimiento superficial de la cuenca.

| Densidad de drenaje (km/km ²) | Interpretación |
|---|--------------------------|
| Valores cercanos a 0,5 | Pobremente drenada |
| 3,5 | Red de drenaje eficiente |

Tabla 17. Clasificación de las cuencas de acuerdo a su pendiente media

Fuente: Jiménez, Henry. Hidrología Básica. Universidad del Valle. 1986

Para determinar la densidad de drenaje de la cuenca, se utilizó la siguiente ecuación matemática.

$$D_d = \frac{L}{A} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde:

L: Longitud de toda la red de drenaje (km)

A: área de la cuenca (km²)

Para determinar la longitud de todos los cauces dentro de la cuenca del Río Checua, se utilizó el programa computación ArcGIS, en el cual por medio del modelo de elevación del terreno de la zona de estudio se pudo determinar la red de drenaje de la cuenca y la longitud de cada una de ellas, la cual en total es de 352,28 kilómetros.

Finalmente, una vez determinada la longitud de toda la red de drenaje de la cuenca (L), se procedió a calcular la densidad de drenaje.

$$D_d = \frac{352,28 \text{ km}}{170,15 \text{ km}^2} = 2,07 \text{ km}$$

De acuerdo con el valor obtenido de la densidad de drenaje de la cuenca del Río Checua (2,07 km) y las clasificaciones descritas en la tabla 16, se determina que la cuenca objeto de estudio, presenta una red de drenaje eficiente, calculo que se puede corroborar con la información descrita de la vegetación y tipos de suelos presentados en el capítulo 4.3 del presente documento.

En conclusión, el coeficiente es normal para áreas montañosas, característico de zonas con suelos sedimentarios; por cada Km² hay 2,07 km de cauce.

7.2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

7.2.1. Análisis de la información meteorológica obtenida.

La distribución temporal de las lluvias depende en gran parte del desplazamiento latitudinal de la zona de convergencia intertropical (ZCIT). La zona de estudio se halla ubicada bajo la influencia de la circulación atmosférica tropical, compuesta esquemáticamente por núcleos de alta presión (anticiclones), centrados en unos trópicos y por una zona de depresión, denominada zona de convergencia intertropical (ZCIT), situada entre éstos.

La diferencia de presión entre los anticiclones y la ZCIT, origina un flujo superficial de aire desde los trópicos hasta el Ecuador; este flujo, desviado por el movimiento de rotación de la Tierra, constituye los vientos alisios, el del Nororiente en el hemisferio norte, y el del Sureste en el hemisferio sur. Es así como la información debe de tener un análisis enfocado con el comportamiento de la zona. El estudio está basado en la recopilación y procesamiento de la información de estaciones climatológicas y pluviométricas ubicadas dentro de la cuenca, los principales parámetros analizados son la precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y evaporación (Ver Anexo D y D-1), así como la información climatológica de imágenes satelitales (ver Anexo E).

7.2.1.1. Estaciones meteorológicas.

- **Información pluviométrica**

La precipitación es, en general, el término que se refiere a todas las formas de humedad emanadas de la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre, tales como lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada.

Para los fines del estudio, se analizaron los datos de siete (7) estaciones localizadas dentro de la cuenca. Estas estaciones fueron seleccionadas por poseer suficiente información y por encontrarse estratégicamente ubicadas sin tener variaciones bruscas de pendiente y topografía que afecten la representatividad de los datos.

Las estaciones escogidas para la investigación se presentan en la Tabla 18, en la cual se relaciona el nombre de cada estación, su categoría, el periodo de registros de cada una, los años faltante y el número de datos vacíos de los registros proporcionados por el Sistema de Información Climatológica e Hidrológica – SICLICA de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR.

| No. | ESTACIONES | CATEGORIA | PERIODO DE REGISTRO | AÑOS FALTANTES | No. DE DATOS FALTANTES |
|-----|----------------|-----------|---------------------|-------------------|------------------------|
| 1 | LADERA GRANDE | PG | 1986-2019 | 2004 | 29 |
| 2 | HOYO ARRIBA EL | PG | 1986-2018 | 2004, 2005 y 2016 | 57 |
| 3 | CHECUA | CP | 1953-2019 | - | 13 |
| 4 | ALTO DE AIRE | PG | 1986-2019 | - | 7 |
| 5 | EL LLANO | PG | 1988-2019 | 2004 | 13 |
| 6 | BARRANCAS | CO | 1966-2019 | - | 36 |
| 7 | ACANDY | PM | 1977-2019 | - | 33 |

Tabla 18. Resume del estado de los registros de la información del parámetro de precipitaciones de las estaciones escogidas para la investigación.

Fuente: SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica.

Conforme con los registros de información de precipitaciones adquiridos, se determinó inicialmente como periodo común entre las siete (7) estaciones ubicadas dentro de la cuenca del Río Checua, los años 1988 al 2018, obteniendo un periodo de lluvias de 30 años, optando por este, debido a que la mayor parte de las estaciones poseen información dentro de este rango, descartando el año 2019, toda vez que ninguna estación registró información completa para poder realizar la complementación de datos los vacíos.

Ahora bien, de acuerdo con el registro de información de precipitación obtenida a través del satélite meteorológico Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM del sensor remoto GIOVANNI (teledetección), fue necesario definir nuevamente el periodo de lluvias, toda vez que el referido satélite, registró información de precipitación desde el año 1998 al 2019 (21 años), para lo cual se obtuvo el siguiente resumen del estado de los registros de precipitación de las estaciones meteorológicas utilizada para el estudio de la zona.

| No. | ESTACIONES | CATEGORIA | PERIODO DEFINIDO | AÑOS FALTANTES | No. DE DATOS FALTANTES |
|-----|----------------|-----------|------------------|-------------------|------------------------|
| 1 | LADERA GRANDE | PG | 1998-2018 | 2004 | 20 |
| 2 | HOYO ARRIBA EL | PG | 1998-2018 | 2004, 2005 y 2016 | 93 |
| 3 | CHECUA | CP | 1998-2018 | - | 2 |
| 4 | ALTO DE AIRE | PG | 1998-2018 | - | 0 |
| 5 | EL LLANO | PG | 1998-2018 | 2004 | 17 |
| 6 | BARRANCAS | CO | 1998-2018 | - | 20 |
| 7 | ACANDY | PM | 1998-2018 | - | 13 |

Tabla 19. Resume del estado de los registros de la información del parámetro de precipitaciones de las estaciones escogidas para la investigación conforme al periodo definido para las lluvias.

Fuente: SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica.

Aunado con lo anterior, y debido a que la norma climática estableció como mínimo un registro de 30 años para determina la variabilidad climática de una zona, se realizaron tres balances hídricos, dos con datos de estaciones meteorológicas con periodos de lluvias comunes, uno de 1988 al 2018 (30 años) y el otro de 1998 al 2018 (20 años), y un balance con los datos obtenidos de teledetección, aclarando que únicamente se compararon y analizaron los resultados de los balances hídricos con periodos comunes entre estaciones y teledetección.

- **Análisis y cálculos estadísticos de la información de los registros de precipitación de las estaciones seleccionadas para la investigación.**

Determinados los periodos comunes para las siete (7) estaciones meteorológicas que tiene influencia directa sobre la cuenca de estudio, se procedió con estas a realizar la complementación de datos faltantes de precipitación, reiterando que la selección de las estaciones se basó, principalmente, en función de su ubicación geográfica y de los criterios antes descritos.

Ahora bien, en esta investigación se consideraron las precipitaciones medias mensuales multianuales, correspondientes a dos periodos de años hidrológicos (periodo 1988 – 2018 y periodo 1998 - 2018), registros de datos pluviales a los cuales se les efectuó un manejo preliminar, el cual consistió en realizar en las siete

estaciones seleccionadas, una corrección o análisis de consistencia, y la estimación de datos faltantes.

Posteriormente, para visualizar la homogeneidad de la estadística pluviométrica, se graficaron las precipitaciones acumuladas, correspondientes a pares de estaciones cercanas, con el fin de detectar la existencia de posibles quiebres o diferencias de pendientes en las curvas, provocados, por ejemplo, por cambios en la localización de la estación de medida y errores sistemáticos en las mediciones, entre otros, o si responden a una tendencia natural de la serie¹⁰². Este método de corrección se conoce como curvas doble acumuladas o doble masa (UNESCO, ROSTLAC, 1982; Linsley et al., 1988; Estrela, 1992) y se utiliza para detectar errores sistemáticos en los registros hidrológicos.

Para completar los vacíos encontrados en los registros de datos de las estaciones y reportados en las tablas 18 y 19, se utilizaron dos métodos: Inverso de la Distancia (IDW) y Correlaciones Simples (regresiones lineales simples) entre las siete estaciones, destacando que la literatura destaca los referidos métodos como los más completos y apropiados para este tipo de investigaciones.

- Método Inverso de la Distancia – IDW.

Para la complementación de datos vacíos o faltantes de los periodos de lluvias previamente identificados, se procedió, a través del programa computacional ArcGIS y su herramienta “measure”, a determinar las distancias entre las estaciones ubicadas dentro de la cuenca del Río Checua, para posteriormente, en el programa Excel ingresar la ecuación matemática del método IDW, y calcular las precipitaciones mensuales de cada mes, que presentaban registros de datos faltantes, para finalmente contar con un histórico de datos completos.

¹⁰² ESTRELA, T. Metodología y recomendaciones para la evaluación de recursos hídricos. Informe técnico. Madrid: MOPFMA, 1992, 52 pp.



| METODO DEL INVERSO DE LA DISTANCIA (IDW) | | | | | | | |
|--|---------------|----------------|--------|--------------|----------|-----------|--------|
| Distancia en km | | | | | | | |
| | LADERA GRANDE | HOYO ARRIBA EL | CHECUA | ALTO DE AIRE | LLANO EL | BARRANCAS | ACANDY |
| LADERA GRANDE | 1 | 4,25 | 6,30 | 4,30 | 2,65 | 4,30 | 13,13 |
| HOYO ARRIBA EL | 4,25 | 1 | 4,93 | 5,44 | 3,22 | 3,00 | 12,02 |
| CHECUA | 6,30 | 4,93 | 1 | 9,74 | 7,24 | 7,74 | 7,17 |
| ALTO DE AIRE | 4,30 | 5,44 | 9,74 | 1 | 2,49 | 2,91 | 17,32 |
| LLANO EL | 2,65 | 3,22 | 7,24 | 2,49 | 1 | 1,63 | 14,35 |
| BARRANCAS | 4,30 | 3,00 | 7,74 | 2,91 | 1,63 | 1 | 14,89 |
| ACANDY | 13,13 | 12,02 | 7,17 | 17,32 | 14,35 | 14,89 | 1 |

Ilustración 42. Insumos para la complementación de vacíos por el método IDW.

Fuente: Autores.

- Correlaciones Simples (regresiones lineales simples).

Para complementar los datos vacíos por el método de correlaciones simples, se procedió por medio del programa computacional Excel a determinar las correlaciones con sus respectivas gráficas y ecuaciones de la regresión lineal con las estaciones sin sus datos vacíos, para finalmente, escoger la mejor ecuación resultante de acuerdo con la correlación de las estaciones, y calcular la precipitación resultante de cada mes de los registros faltantes.

En la Tabla 20, se muestra el resultado de las correlaciones entre las siete estaciones y su respectiva clasificación, con la cual se determinó qué estaciones con datos vacíos se debían correlacionar con la estación que si contara con el registro mensual para el mes correspondiente.

| Matriz de Correlación | | | | | | | | | |
|-------------------------|----|------------------------|--------|--------|--------|---------------|---------------|--------|----------|
| | | Estación de Referencia | | | | | | | PROMEDIO |
| | | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | |
| Estación a complementar | E1 | 1,000 | 0,5957 | 0,8782 | 0,9090 | 0,9346 | 0,9275 | 0,7142 | 0,8265 |
| | E2 | 0,5957 | 1,000 | 0,5438 | 0,6423 | 0,6687 | 0,6637 | 0,5365 | 0,6084 |
| | E3 | 0,8782 | 0,5438 | 1,000 | 0,8481 | 0,8704 | 0,8830 | 0,7796 | 0,8005 |
| | E4 | 0,9090 | 0,6423 | 0,8481 | 1,000 | 0,9103 | 0,9065 | 0,7034 | 0,8199 |
| | E5 | 0,9346 | 0,6687 | 0,8704 | 0,9103 | 1,000 | 0,9435 | 0,7383 | 0,8443 |

| | | | | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|---------------|
| | E6 | 0,9275 | 0,6637 | 0,8830 | 0,9065 | 0,9435 | 1,000 | 0,7211 | 0,8409 |
| | E7 | 0,7142 | 0,5365 | 0,7796 | 0,7034 | 0,7383 | 0,7211 | 1,000 | 0,6989 |
| TOTAL | | | | | | | | | 0,7771 |
| Clasificación coeficiente de correlación | | | | | | | | | |
| | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | | |
| E1 | Perfecto | Regular | Bueno | Bueno | Bueno | Bueno | Regular | | |
| E2 | Regular | Perfecto | Regular | Regular | Regular | Regular | Regular | | |
| E3 | Bueno | Regular | Perfecto | Bueno | Bueno | Bueno | Regular | | |
| E4 | Bueno | Regular | Bueno | Perfecto | Bueno | Bueno | Regular | | |
| E5 | Bueno | Regular | Bueno | Bueno | Perfecto | Excelente | Regular | | |
| E6 | Bueno | Regular | Bueno | Bueno | Excelente | Perfecto | Regular | | |
| E7 | Regular | Regular | Regular | Regular | Regular | Regular | Perfecto | | |

Tabla 20. Resultado de las correlaciones de las estaciones por el método de regresión lineal.

Fuente: Autores.

Finalmente, se realizó la correlación dependiendo del número de datos y de la ubicación de las estaciones; el coeficiente de correlación fue representativo, ya que el valor promedio fue 0,77.

- Análisis de dobles masas

Una vez complementados los registros faltantes o vacíos de seis de las siete estaciones meteorológicas que presentaban la necesidad de llenado, se empleó el método de análisis de doble masa, el cual es utilizado para verificar la homogeneidad de los datos en una estación pluviométrica, con este se quiere comprobar si hubo alguna anomalía en alguna estación pluviométrica durante algún período, tal como el cambio de lugar de dicha estación, cambio de las condiciones del aparato registrador, o modificaciones en su método de construcción. El método consiste en construir una curva doble acumulativa, en la cual son relacionados los totales anuales acumulados de precipitación de un determinado lugar y la media acumulada de los totales anuales de todas las estaciones de la cuenca, considerada climatológicamente homogénea y por consiguiente homogénea desde el punto de vista de datos, construyendo una gráfica por cada estación.

De acuerdo con el análisis realizado a las gráficas, se observó que las líneas de tendencia encajan perfectamente sobre los puntos, logrando así concluir que los datos son homogéneos, es decir, son aceptables para estimar un período de una estación en función de la otra.

Finalmente, a los registros de las siete estaciones a las cuales les fueron llenados los datos vacíos por medio de los métodos IDW y correlaciones simples, se les determinó el cambio porcentual de la media respecto a las series originales y el cambio porcentual de la desviación estándar, resultados que permitieron establecer que los cálculos de la precipitación media mensual multianual de la cuenca serían más homogéneos por medio del llenado del Inverso de la Distancia – IDW.

En los anexos D (periodo de lluvia de 30 años) y D-1 (periodo de lluvias de 20 años), se relacionan los archivos Excel, donde se presenta de manera detallada en diferentes hojas de cálculos, las operaciones y gráficos realizados para cada una de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del Río Checua, con los cuales se justifican los resultados obtenidos.

7.2.1.1.1. Precipitación

Una vez completados los datos vacíos de las siete estaciones seleccionadas para la investigación, se estableció para ambos periodos comunes (1988 – 2018 y 1998 – 2018), el siguiente régimen pluviométrico:

- Régimen Pluviométrico Bimodal: Caracterizado por presentar dos períodos típicos de lluvias en el año, uno más lluvioso en el primer semestre (marzo a mayo y de octubre a noviembre) y otro menos lluvioso (diciembre a febrero y de junio a septiembre).

Las gráficas de precipitación media de cada una de las estaciones de los dos periodos comunes, se relacionan en el anexo D y D-1 en los archivos denominados “2_Complementacion_Vacios_IDW_y_Doble_Masas_Precipitacion” respectivamente.

7.2.1.1.2. Precipitación media sobre la cuenca

La precipitación media sobre una cuenca en estudio es importante, toda vez, que es necesaria para la determinación del balance hídrico, o, una vez analizados los registros y comparados con otras estaciones, se puede utilizar esta información para la cuantificación de la lluvia en una cuenca hidrográfica para un determinado tiempo específico (anual o multianual), para lo cual se puede hacer uso de tres métodos: aritmético, polígonos de Thiessen e isoyetas.

Para esta investigación se omitirá el método aritmético, ya que este, es poco utilizado en razón a que provee una buena estimación siempre y cuando los aparatos pluviométricos están distribuidos uniformemente en la cuenca estudiada, el área de esta sea bastante plana y la variación de las medidas pluviométricas entre los aparatos sea pequeña.

Ahora bien, en razón a que en la cuenca del Río Checua presenta un número bajo de estaciones y una mala distribución, el cálculo de la precipitación media de la cuenca, se realizó por medio del método de polígonos de THIESSEN. Este método es seguro y confiable para tratar información pluviométrica, lo cual ha sido comprobado en diferentes estudios e investigaciones realizadas con anterioridad, las cuales, contrastaron este método con las isoyetas (calculadas por medio del programa ArcGIS), y encontrando que no existían diferencias significativas entre ambos métodos. Con el fin de desarrollar lo mencionado, se utilizaron los datos de las siete estaciones relacionadas en la Tabla 5. De esta manera se obtuvieron las precipitaciones medias resultantes mensuales y anuales de la cuenca del Río Checua (Tabla 21 – periodo común 1988 – 2018 y Tabla 23 periodo común 1998 – 2018).

| AREA (Km ²) | ESTACION | Factor THIESSEN |
|---|--|-----------------|
| 26,35 | LADERA GRANDE | 0,155 |
| 13,73 | HOYO ARRIBA EL | 0,081 |
| 63,71 | CHECUA | 0,374 |
| 8,59 | ALTO DE AIRE | 0,050 |
| 6,34 | LLANO EL | 0,037 |
| 3,65 | BARRANCAS | 0,021 |
| 47,78 | ACANDY | 0,281 |
| 170,15 | ÁREA CUENCA RÍO CHECUA | 1,000 |
| CALCULOS PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA CUENCA | | |
| METODO | FORMULA | UNIDADES |
| THIESSEN | $\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times A_i}{\sum A_i}$ Ecuación (17) | mm |

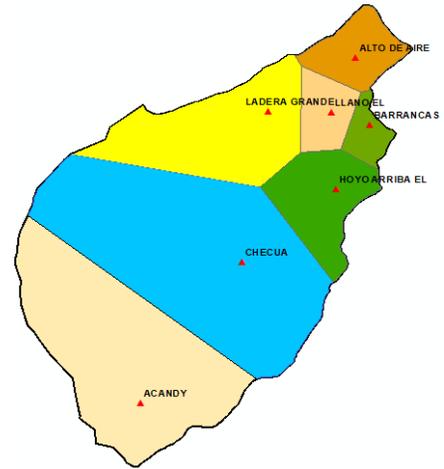


Ilustración 43. Resultados de los polígonos de THIESSEN de las siete estaciones meteorológicas con su respectiva área y factor por estación.

Fuente: Autores.

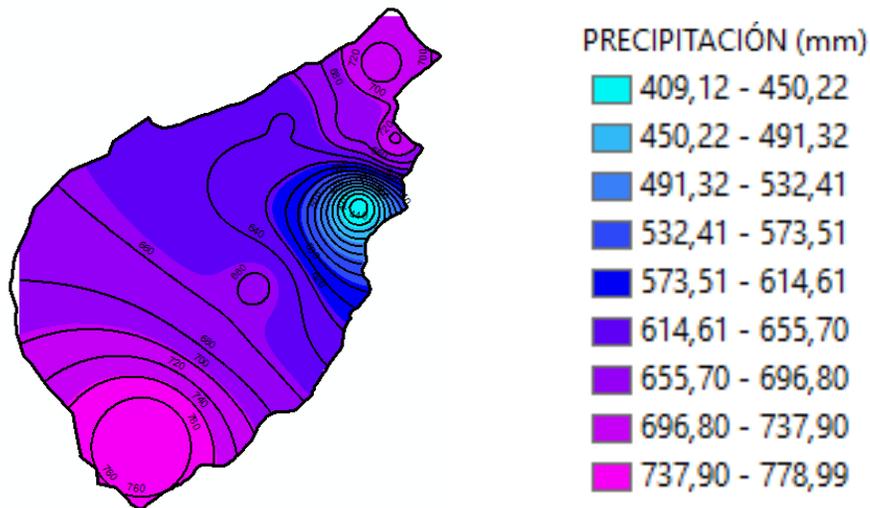


Ilustración 44. Determinación de la precipitación media de la cuenca del Río Checuá por medio del método de Isoyetas.

Fuente: Autores.

Finalmente, conforme con la ponderación de áreas y el factor de THIESSEN obtenido en el programa computacional ArcGIS para cada una de las estaciones, se calculó la precipitación media anual de la cuenca (ver Tabla 21 y 23) y la precipitación media mensual multianual de la misma (ver Tabla 22 y 24) de los periodos comunes 1988 – 2018 y 1998 – 2018.

- **Periodo común 1988 – 2018.**

| POLÍGONO DE THIESSEN | AREA (Km²) | ESTACIÓN | PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL (mm) | PRECIPITACIÓN * ÁREA |
|---|--|----------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1 | 26,35 | LADERA GRANDE | 625,95 | 16493,844 |
| 2 | 13,73 | HOYO ARRIBA EL | 490,22 | 6730,786 |
| 3 | 63,71 | CHECUA | 639,91 | 40768,373 |
| 4 | 8,59 | ALTO DE AIRE | 715,94 | 6149,914 |
| 5 | 6,34 | LLANO EL | 662,84 | 4202,406 |
| 6 | 3,65 | BARRANCAS | 696,92 | 2543,762 |
| 7 | 47,78 | ACANDY | 768,14 | 36701,858 |
| TOTAL | 170,15 | | | 113590,94 |
| CÁLCULOS PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA | | | | |
| MÉTODO | FÓRMULA | RESULTADO | UNIDADES | |
| THIESSEN | $\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times A_i}{\sum A_i}$ | 667,59 | mm | |

Tabla 21. Precipitación media de la cuenca del Río Checua por medio del método de los polígonos de THIESSEN - Periodo común 1988-2018.

Fuente: Autores.

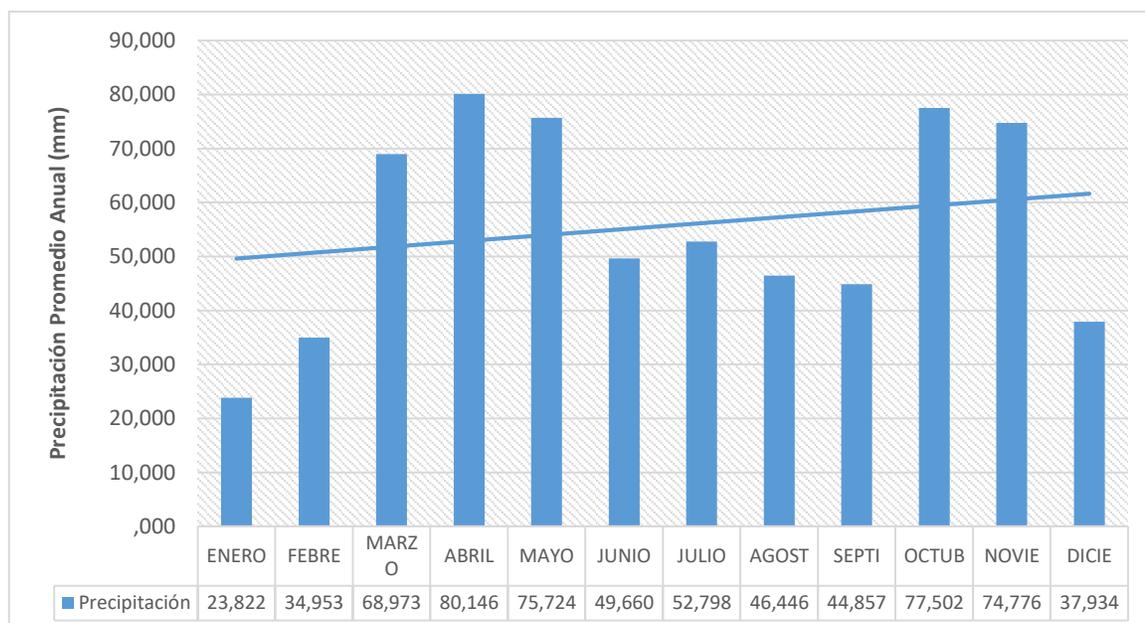
| MES | PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (mm/mes) |
|---------|---|
| Enero | 23,82 |
| Febrero | 34,95 |
| Marzo | 68,97 |
| Abril | 80,15 |
| Mayo | 75,72 |
| Junio | 49,66 |
| Julio | 52,80 |

| MES | PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (mm/mes) |
|-----------------------|--|
| Agosto | 46,45 |
| Septiembre | 44,86 |
| Octubre | 77,50 |
| Noviembre | 74,78 |
| Diciembre | 37,93 |
| TOTAL (mm/año) | 667,59 |

Tabla 22. Valores de precipitación media mensual multianual obtenidos por el método de polígonos de THIESSEN y los programas ArcGIS y Excel – Periodo común 1988-2018.

Fuente: Autores.

Obtenida la precipitación media mensual multianual de la cuenca de Río Checua, se procedió a graficar este parámetro, con el fin de comparar el régimen bimodal determinado por medio de las siete estaciones meteorológicas y descrito anteriormente, evidenciando que coinciden en su totalidad.



Gráfica 5. Precipitación media mensual multianual de la cuenca - periodo 1988-2018.
Fuente: Autores.

La precipitación promedio anual de la cuenca del Río Checua para el periodo común de 1988 al 2018 es de 667,59 mm, a nivel temporal cae aproximadamente el 65% de las lluvias en forma de aguaceros torrenciales, en dos épocas del año (marzo-mayo y octubre-noviembre); y un periodo seco (diciembre a febrero y de junio a septiembre) donde cae un 35% del total anual. (Ver Gráfica N° 5).

- **Periodo común 1998 – 2018.**

| POLÍGONO DE THIESSEN | AREA (Km²) | ESTACIÓN | PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL (mm) | PRECIPITACIÓN * ÁREA |
|----------------------|------------|----------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1 | 26,35 | LADERA GRANDE | 638,60 | 16.827,199 |
| 2 | 13,73 | HOYO ARRIBA EL | 418,97 | 5.752,522 |
| 3 | 63,71 | CHECUA | 661,73 | 42.158,932 |
| 4 | 8,59 | ALTO DE AIRE | 730,94 | 6.278,799 |
| 5 | 6,34 | LLANO EL | 688,64 | 4.365,981 |

| POLÍGONO DE THIESSEN | AREA (Km ²) | ESTACIÓN | PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL (mm) | PRECIPITACIÓN * ÁREA |
|---|--|---------------|-----------------------------------|----------------------|
| 6 | 3,65 | BARRANCAS | 722,15 | 2.635,830 |
| 7 | 47,78 | ACANDY | 779,37 | 37.238,253 |
| TOTAL | | 170,15 | | 115.257,52 |
| CALCULOS PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA CUENCA DEL RIO CHECUA | | | | |
| METODO | FORMULA | | RESULTADO | UNIDADES |
| THIESSEN | $\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times A_i}{\sum A_i}$ | | 677,39 | mm |

Tabla 23. Precipitación media de la cuenca del Río Checua por medio del método de los polígonos de THIESSEN - Periodo común 1998-2018.

Fuente: Autores.

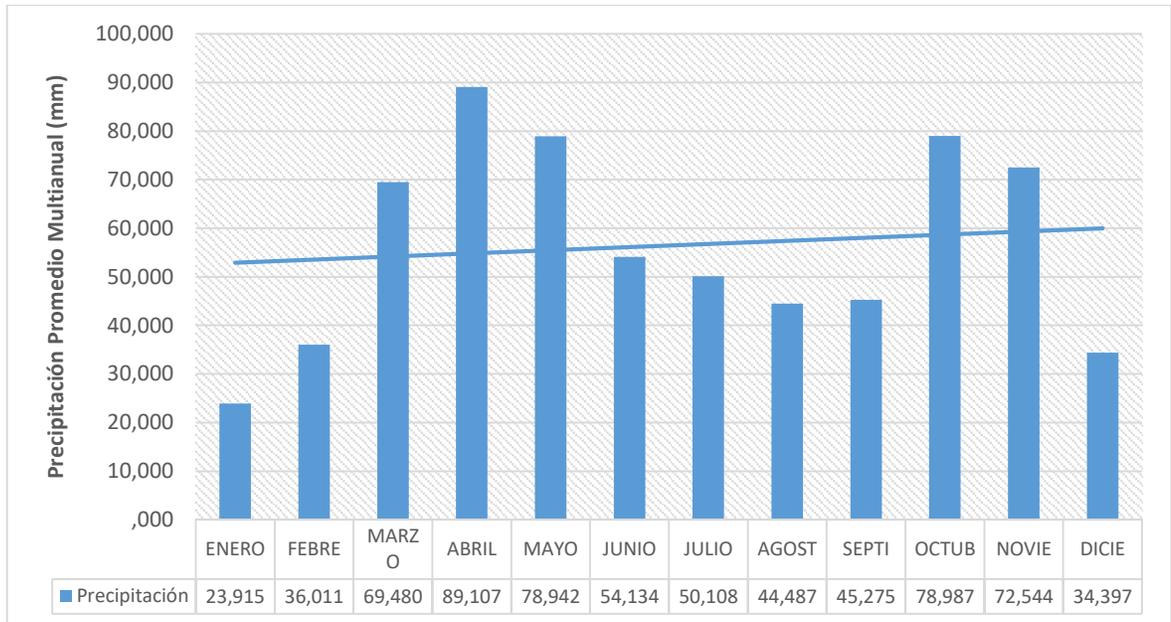
| MES | PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (mm/mes) |
|-----------------------|---|
| Enero | 23,92 |
| Febrero | 36,01 |
| Marzo | 69,48 |
| Abril | 89,11 |
| Mayo | 78,94 |
| Junio | 54,13 |
| Julio | 50,11 |
| Agosto | 44,49 |
| Septiembre | 45,28 |
| Octubre | 78,99 |
| Noviembre | 72,54 |
| Diciembre | 34,40 |
| TOTAL (mm/año) | 677,39 |

Tabla 24. Valores de precipitación media mensual multianual obtenidos por el método de polígonos de THIESSEN y los programas ArcGIS y Excel – Periodo común 1998-2018.

Fuente: Autores.

Obtenida la precipitación media mensual multianual de la cuenca de Río Checua, se procedió a graficar este parámetro, con el fin de comparar el régimen bimodal

determinado por medio de las siete estaciones meteorológicas y descrito anteriormente, evidenciando que coinciden en su totalidad, junto con la gráfica 5 del periodo común 1988 – 2018.



Gráfica 6. Precipitación media mensual multianual de la cuenca - periodo 1998-2018.

Fuente: Autores.

La precipitación promedio anual de la cuenca del Río Checua para el periodo común de 1998 al 2018 es de 677,39 mm, a nivel temporal cae aproximadamente el 65% de las lluvias en forma de aguaceros torrenciales, en dos épocas del año (marzo-mayo y octubre-noviembre); y un periodo seco (diciembre a febrero y de junio a septiembre) donde cae un 35% del total anual (ver Gráfica 6).

Ahora bien, por medio del mapa de isoyetas (Ilustración 43) se pudo determinar lo siguiente:

- En la parte alta de la cuenca observamos precipitaciones que oscilan entre 660 mm y 720 mm.

- En la parte baja se presentan núcleos de altas precipitaciones que van de 680 mm. a 760 mm.
- La precipitación media es 675 mm.

Conforme con lo anterior, se sustenta lo manifestado anteriormente en relación con que no existían diferencias significativas entre los métodos de THIESSEN e isoyetas.

Se observa que las precipitaciones en la parte alta de la cuenca son menores que en la parte baja, esto es debido a la topografía existente en la parte alta y a su característica desértica, lo cual hace casi imposible la formación de núcleos de lluvia.

Finalmente, se evidencia que los cambios en la precipitación media de la cuenca del Río Checua para los periodos comunes 1988 – 2018 y 1998 – 2018, presentan una diferencia de 9,8 mm, con lo cual se determina que entre más grande el periodo común, se obtiene valores más representativos, así mismo, en relación con la precipitación media mensual de la cuenca de ambos periodos comunes, se concluye que se comportan de manera similar.

7.2.1.1.3. Otros parámetros meteorológicos.

El régimen hidrológico está influenciado por factores físicos, geológicos, topográficos y climatológicos, los cuales definen las características propias de la cuenca.

El clima de una región está determinado por el conjunto de fenómenos atmosféricos, como la precipitación, la evaporación, la temperatura, la humedad del aire y los vientos.

Con el fin de poder estimar un mejor régimen hidrológico de la cuenca del Río Checua, se determinó que, dentro de esta se encontraba con una estación climatológica principal denominada Checua (2120540), la cual posee información superior a más de 20 años de los parámetros de temperatura, humedad relativa del aire, brillos solar y evaporación; de los cuales se obtuvo el valor medio, se graficó y

se analizó cada parámetro para los periodos comunes 1988 – 2018 y 1998 - 2018 (Ver Anexos D y D-1 archivos Excel denominados “6_Parametros_Meteorologico_Estación_Checua”), datos climatológicos y meteorológicos proporcionados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR.

- Temperatura

La temperatura del aire en el suelo difiere en promedio, de un lugar a otro de la superficie terrestres y, en un punto dado, está sometida a cambios determinados por el tiempo; como depende en primer lugar de la insolación, se comprende que varíe poco, a lo largo del año, en las zonas ecuatoriales. Existen en primer lugar, tres temperaturas diurnas (24 horas considerables): La máxima, generalmente registrada de día, la mínima, que se suele registrar durante la noche y la media, que es el promedio de ambas. La diferencia entre la mínima y la máxima constituye la amplitud. También existe una máxima, una media y una mínima mensuales. La temperatura mensual y temperatura anual designan la media aritmética de todos los días del mes o del año. La diferencia entre la media mensual de los meses más cálidos y fríos es la amplitud anual.

Para la determinación de la temperatura media mensual de la cuenca del Río Checua, se tomaron los registros de valores medios mensuales de temperatura (°C) de la estación climatológica principal denominada CHECUA, la cual se encuentra activa desde el año 1953, y está a cargo de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR (SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica). Por medio del programa computacional Excel se realizó el tratamiento de los datos.

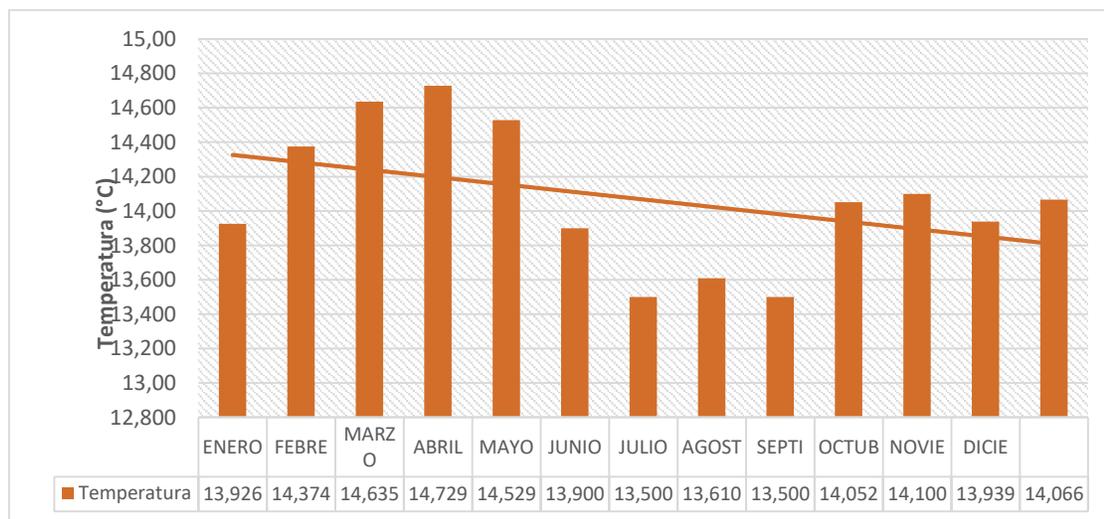
- Periodo común 1988 – 2018.

La temperatura media anual es de 14,1°C con pequeñas variaciones que fluctúan entre 14,7°C y 13,6°C, siendo los meses de febrero a mayo y de octubre a noviembre los meses que presentan valores más altos. Los valores medios más bajos se presentan en los meses de enero, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre (Ver Tabla 25 y Gráfica 7).

| MES | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) |
|------------|---|
| Enero | 13,9 |
| Febrero | 14,4 |
| Marzo | 14,6 |
| Abril | 14,7 |
| Mayo | 14,5 |
| Junio | 14,0 |
| Julio | 13,6 |
| Agosto | 13,6 |
| Septiembre | 13,7 |
| Octubre | 14,1 |
| Noviembre | 14,3 |
| Diciembre | 13,9 |

Tabla 25. Valores de temperatura media mensual multianual obtenidos de la estación climatológica principal CHECUA – Periodo 1988-2018.

Fuente: Autores.



Gráfica 7. Temperatura media mensual multianual de la cuenca – periodo 1988-2018.

Fuente: Autores.

La temperatura máxima que se presentó es de 17,8°C en el mes de abril y la temperatura mínima de 11,7°C en el mes de julio; coincidiendo con el período más lluvioso, y el más seco respectivamente (Ver Anexos D y D-1 archivos Excel denominados “6_Parametros_Meteorologico_Estación_Checua”).

Finalmente, respecto a los fuertes vientos¹⁰³ de velocidades hasta de 80 km/h (22 m/seg) se determinó que es un factor que acelera la erosión eólica, lo cual genera un aumento en el déficit de agua y es un limitante para el desarrollo de la vegetación.

- **Periodo común 1998 – 2018.**

La temperatura media anual es de 14,0°C con pequeñas variaciones que fluctúan entre 14,6°C y 13,3°C, siendo los meses de febrero a mayo y de octubre a noviembre los meses que presentan valores más altos. Los valores medios más bajos se presentan en los meses de enero, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre (Ver Tabla 26 y Gráfica 8).

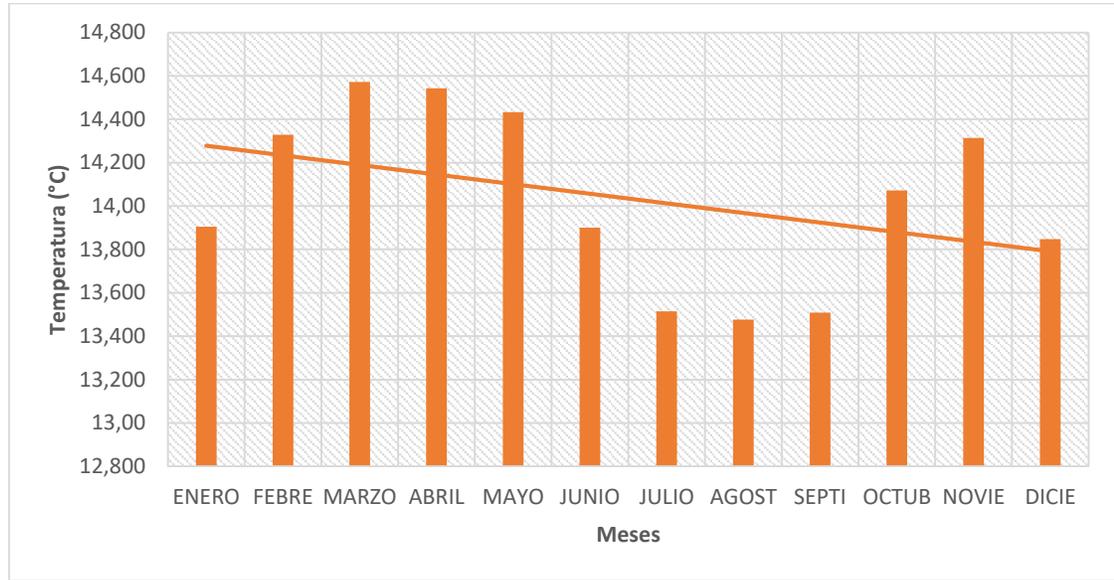
| MES | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) |
|------------|--|
| Enero | 13,9 |
| Febrero | 14,3 |
| Marzo | 14,6 |
| Abril | 14,5 |
| Mayo | 14,4 |
| Junio | 13,9 |
| Julio | 13,5 |
| Agosto | 13,5 |
| Septiembre | 13,5 |
| Octubre | 14,1 |
| Noviembre | 14,3 |

¹⁰³ ORTIZ ARANGO & CIA, CONSULTORÍA TÉCNICA AGROPECUARIA. Estudio de Desarrollo y Manejo Integral de la Cuenca del Río Checua, TOMO IA. Bogotá, 1.980.

| MES | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) |
|-----------|---|
| Diciembre | 13,8 |

Tabla 26. Valores de temperatura media mensual multianual obtenidos de la estación climatológica principal CHECUA – Periodo 1998-2018.

Fuente: Autores.



Gráfica 8. Temperatura media mensual multianual de la cuenca – periodo 1998-2018.

Fuente: Autores.

La temperatura máxima que se presentó es de 17,7°C en el mes de abril y la temperatura mínima de 11,6°C en el mes de julio; coincidiendo con el período más lluvioso, y el más seco respectivamente (Ver Anexos D y D-1 archivos Excel denominados “6_Parametros_Meteorologico_Estación_Checua”).

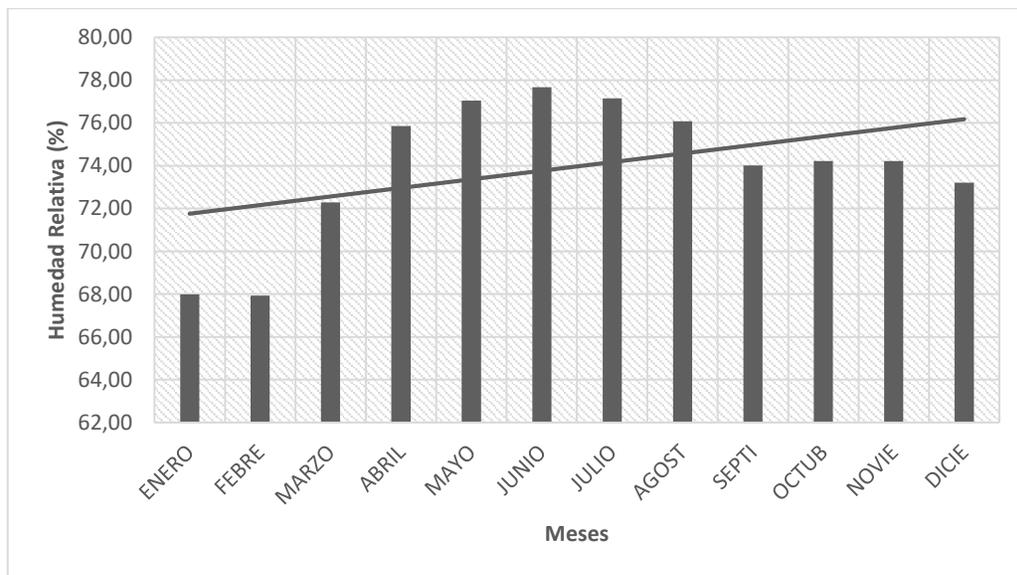
Finalmente, se evidencia que los cambios en la temperatura media de la cuenca del Río Checua para los periodos comunes 1988 – 2018 y 1998 – 2018, presentan una variación de 0,1°C, con esto se puede concluir que la cuenca del Río Checua está localizada en una zona semiárida con temperaturas extremas, dos grandes

limitantes para establecer cobertura vegetal.

- Humedad relativa del aire

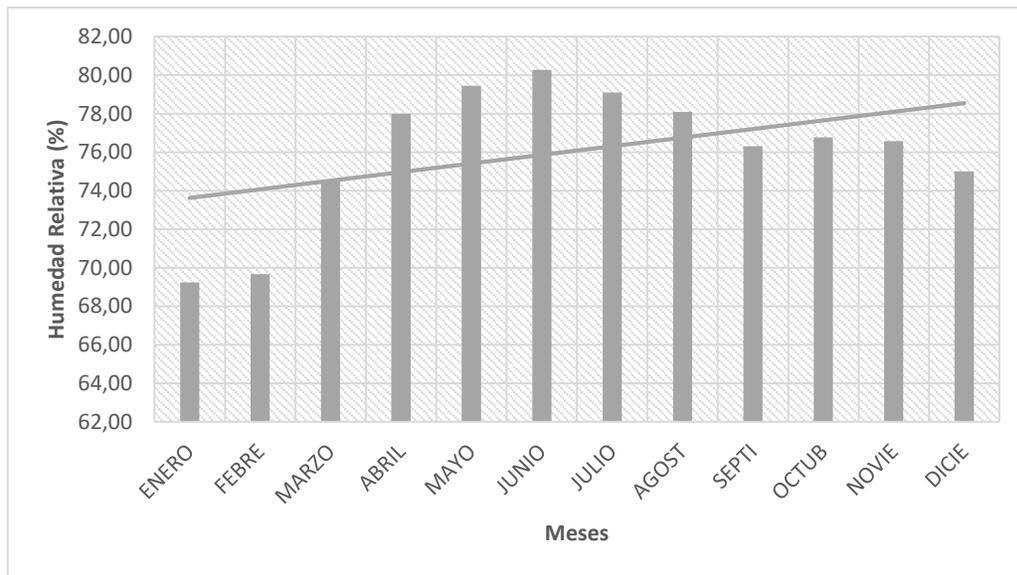
Es la relación porcentual entre la cantidad de humedad en un espacio dado y la cantidad que ese volumen podría contener si estuviera saturado.

Los valores más altos de humedad van acompañados de los períodos de alta precipitación. La humedad del aire media anual que se encontró en la cuenca del Río Checua es de 74% (periodo común 1988-2018) y de 76,1% (periodo común 1988-2018); presentándose los valores más altos en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre; y los valores más bajos en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. En zonas aisladas se presentan microclimas que son influenciados por la clase de vegetación y por el efecto del río (Ver Gráfica 9 y 10, Anexos D y D-1).



Gráfica 9. Humedad Relativa media mensual de la cuenca – periodo 1988-2018.

Fuente: Autores.



Gráfica 10. Humedad Relativa media mensual de la cuenca – periodo 1998-2018.

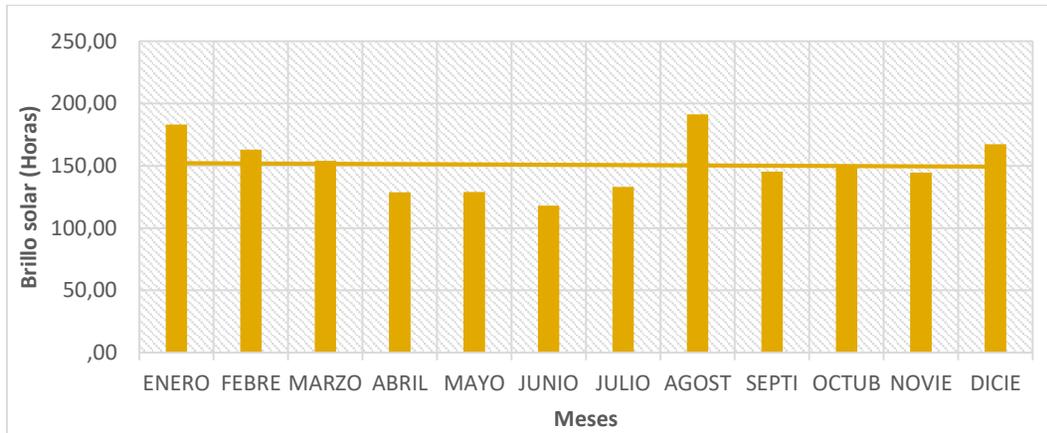
Fuente: Autores.

Conforme con lo anterior, se determinó que teniendo en cuenta que la humedad relativa para los dos periodos comunes de las estaciones meteorológicas se comporta de manera similar, variando únicamente en 2%, se concluye que para la cuenca del río Checua, la humedad relativa media mensual, al contrario de la temperatura, presenta una distribución temporal de tipo monomodal, siguiendo los mismos parámetros de la precipitación, presentando los valores más altos en los meses de abril a agosto, siendo el mes más húmedo junio, con un registro del 79,4%. Los valores más bajos, se observan en los meses de enero, febrero y marzo, siendo enero el que presenta el menor registro, con un valor del 69%.

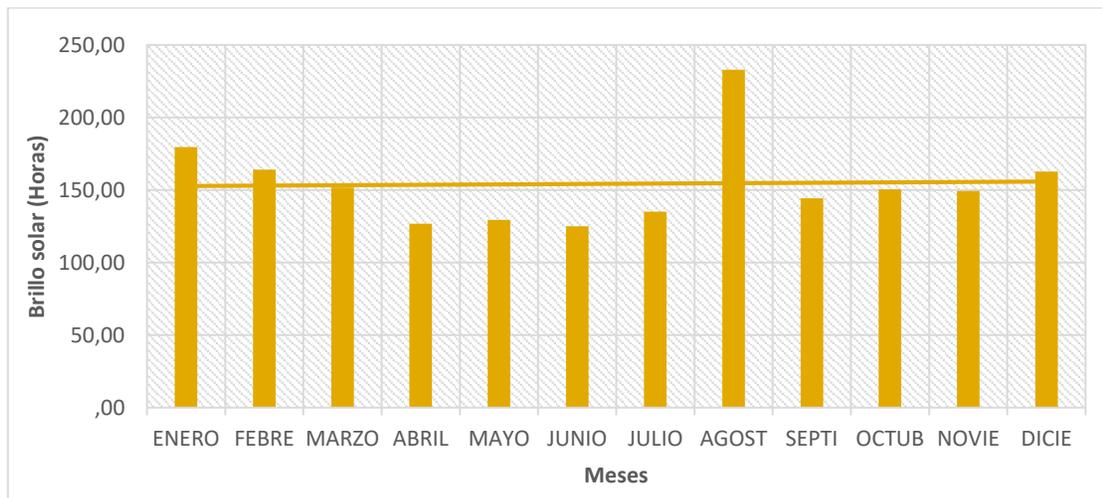
- Brillo solar

El brillo solar está inversamente relacionado con la nubosidad y a su vez con la precipitación. El valor total anual de brillo solar es de 1.852 horas, con un promedio mensual de 154 horas; presentándose un período de alta insolación en los meses de diciembre, enero, marzo, julio y octubre (correspondiente al periodo de bajas

lluvias), siendo el valor más alto en enero con 238 horas; y otro período de baja insolación en abril, mayo, junio, julio y septiembre (periodo de altas lluvias), siendo el valor más bajo en junio con 36 horas (Ver Gráfica 11 y 12, Anexos D y D-1).



Gráfica 11. Brillo solar mensual de la cuenca – periodo común 1998-2018.
Fuente: Autores

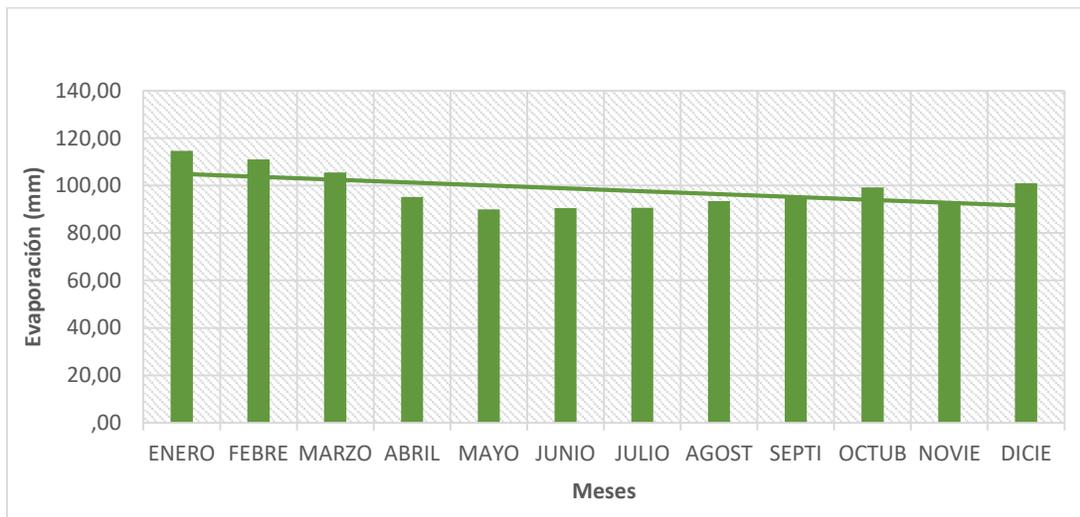


Gráfica 12. Brillo solar mensual de la cuenca – periodo común 1998-2018.
Fuente: Autores

- Evaporación y evapotranspiración

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida pasa al estado de vapor en condiciones naturales; se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo o a una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor. Estos parámetros dependen de factores como la latitud y la elevación donde esté ubicada la estación.

La evaporación se concibe también como la cantidad de agua perdida por el conjunto planta-suelo debido a las condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas existentes; está directamente relacionada con el brillo solar, presentándose las mayores evaporaciones en los períodos más secos (enero, febrero, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre), teniendo el mes de enero el valor más alto de 114,2 mm de evaporación; los períodos de menor evaporación corresponden a los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, teniendo en el mes de mayo el menor valor de 87,7 mm de evaporación (Ver Gráfica 13 y 14, Anexos D y D-1).



Gráfica 13. Evaporación mensual de la cuenca – periodo 1988-2018.

Fuente: Autores



Gráfica 14. Evaporación mensual de la cuenca – periodo 1998-2018.

Fuente: Autores

Con respecto a la evapotranspiración, esta es el conjunto de los fenómenos de evaporación y transpiración.

La evapotranspiración potencial (ETP) se entiende como la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación de las plantas, permitiendo definir así con exactitud cuando una región es húmeda o seca. Los valores de evapotranspiración mensual fueron calculados con los registros de temperatura mensual obtenidos de la estación climatológica principal (CP) Checua, para los dos periodos comunes de las estaciones (tablas 25 y 26), a través del Método de Thornthwaite, cuyos resultados se presentan en las tablas 31 y 34.

Finalmente, la evapotranspiración real (ETR) es la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, en las condiciones reinantes atmosféricas y de humedad del suelo, por fenómenos de evaporación y transpiración de las plantas. El cálculo de esta variable, fue realizado como resultado final de los balances hídricos para ambos periodos comunes, cuyos resultados se reportaron en las tablas 32 y 35.

7.2.1.2. Teledetección – Sensores Remotos (satélites Meteorológicos)

Para la caracterización climática de la zona de estudio por medio de la teledetección, se empleó únicamente los parámetros de precipitación y temperatura, los cuales fueron obtenidos por medio del sensor remoto GIOVANNI y sus satélites meteorológicos Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM y MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 respectivamente, el cual es una misión entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) designada para monitorear y estudiar las precipitaciones tropicales.

- **Información pluviométrica**

Satélite meteorológico Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM del sensor remoto GIOVANNI

Para los fines del estudio, se analizaron los registros de precipitación obtenidos de la imagen satelital Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM, la cual proporcionó una serie de tiempo promedio de área de la tasa de precipitación mensual conforme a las coordenadas geográficas de la cuenca del Río Checua (Ver Tabla 3). Este sensor remoto fue seleccionado, toda vez que es utilizado para la medición de lluvias y es considerado un radar meteorológico de precipitación.

Al ingresar a la página del servidor GIOVANNI y seleccionar los parámetros de búsqueda, se determinó que el satélite TRMM seleccionado para la investigación, contaba con una resolución espacial de $0,25^\circ$ para registros de precipitación de la zona de estudio desde el año 1998 al 2019, siendo esta la resolución más óptima disponible para la descarga de la información de los periodos de lluvia sobre la cuenca del Río Checua.

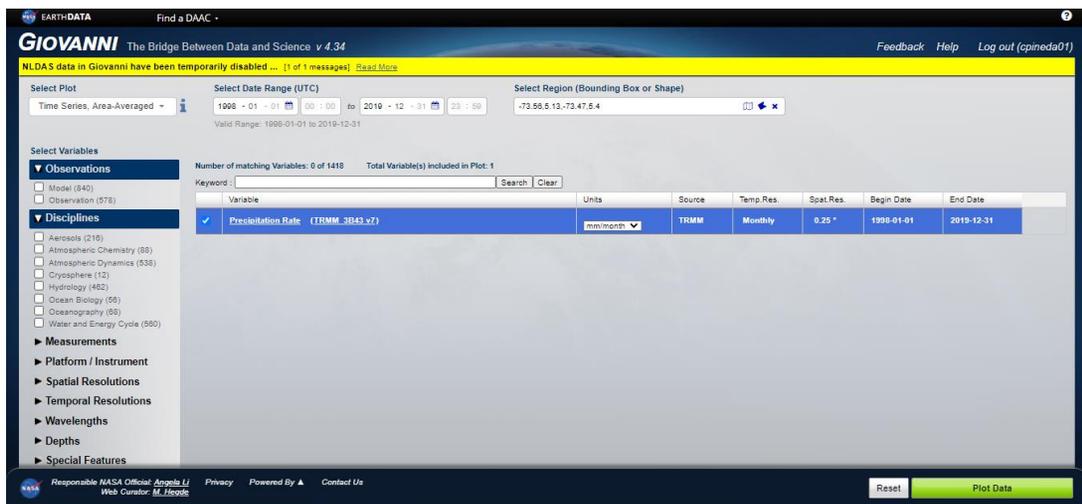


Ilustración 45. Resultado de la búsqueda en el sensor remoto GIOVANNI para el parámetro de precipitación de la zona de estudio.

Fuente: [https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=TRMM_3B43_7_precipitation\(units%3Dmm%2Fmonth\)&portal=GIOVANNI&format=json](https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=TRMM_3B43_7_precipitation(units%3Dmm%2Fmonth)&portal=GIOVANNI&format=json).

Conforme con lo anterior, y de acuerdo con el registro de información proporcionado por SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica de la CAR, se estableció el periodo común de lluvias en los años 1998 al 2018 (20 años), con el cual se realizó el balance hídrico y se comparó con el obtenido por el método de estaciones meteorológicas con el mismo periodo común.

- **Análisis y cálculos estadísticos de la información de los registros de precipitación de la imagen satelital TRRM 3B43 v7 seleccionado para la investigación.**

Descargada la información de precipitación del sensor remoto GIOVANNI, se estableció que esta fue obtenida en formatos JPG, KMZ y CSV (delimitado por comas) – Excel, siendo este último el formato seleccionado para determinar la precipitación media de la cuenca y precipitación media mensual multianual de la misma (Ver Ilustración 45, Gráfica 15 y 16, Tabla 27 y Anexo E).

Una vez descargado el registro pluviométrico en formato CSV, se procedió a organizar la información en formato xlsx (hoja de cálculo Excel), en la cual se identificó que no se contaba con datos faltantes y no era necesario hacer ningún ajuste de estos.

Time Averaged Map of Precipitation Rate monthly 0.25 deg. [TRMM TRMM_3B43 v7] mm/month over 1998-Feb - 2019-Dec, Region 73.56W, 5.13N, 73.47W, 5.4N

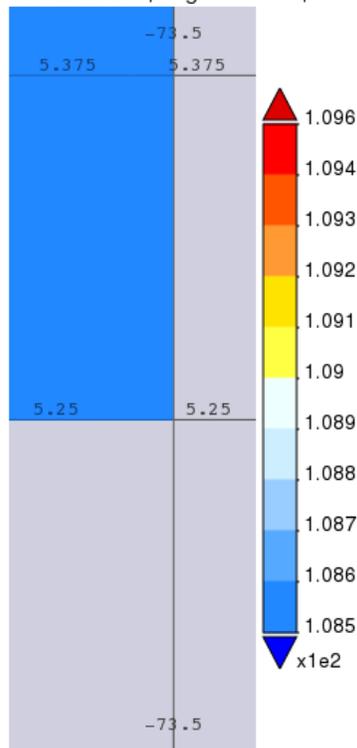
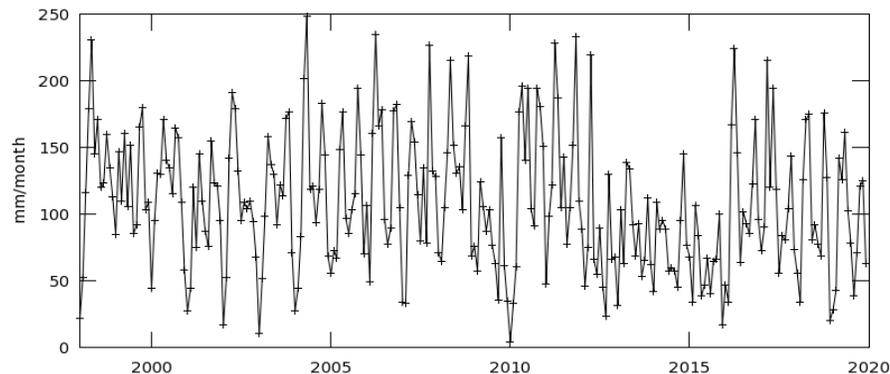


Ilustración 46. Imagen satelital de la precipitación obtenida del satélite TRMM_3B43 v7 de la zona de estudio de la cuenca del Río Checua por sus coordenadas geográficas.

Fuente: [https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=TRMM_3B43_7_precipitation\(units%3Dmm%2Fmonth\)&portal=GIOVANNI&format=json](https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=TRMM_3B43_7_precipitation(units%3Dmm%2Fmonth)&portal=GIOVANNI&format=json).

En la Ilustración 45 se presenta el comportamiento de la precipitación registrada por el satélite meteorológico TRMM_3B43 v7 en un periodo de 21 años (1998 – 2019) en la zona de estudio, la cual es delimitada con las coordenadas geográficas de la cuenca el Río Checua, y relaciona la zona donde se registraron lluvias en color azul, siendo el área establecida geográficamente la única resaltada. Esta ilustración permite evidenciar que el sensor remoto si logra registrar información de precipitación para la cuenca.

Time Series, Area-Averaged of Precipitation Rate monthly 0.25 deg. [TRMM TRMM_3B43 v7] mm/month over 1998-Jan - 2019-Dec, Region 73.56W, 5.13N, 73.47W, 5.4N



- The user-selected region was defined by 73.56W, 5.13N, 73.47W, 5.4N. The data grid also limits the analyzable region to the this point: 73.625W, 5.375N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Gráfica 15. Dispersión de los registros de precipitación del satélite TRMM_3B43 v7 de la zona de estudio de la cuenca del Río Checua por sus coordenadas geográficas

Fuente: [https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=TRMM_3B43_7_precipitation\(units%3Dmm%2Fmonth\)&portal=GIOVANNI&format=json](https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=TRMM_3B43_7_precipitation(units%3Dmm%2Fmonth)&portal=GIOVANNI&format=json)

La Gráfica 15 representa el comportamiento de la precipitación registrada por el satélite meteorológico TRMM_3B43 v7 en un periodo de 21 años (1998 – 2019), con los cuales se puede apreciar la cantidad en milímetros de lluvia que se precipitaron en cada año, evidenciando la intensidad de las lluvias en milímetro mes, así mismo, con esta gráfica se logró establecer la distribución temporal de las lluvias registradas por el método de teledetección, determinando los años donde se registraron precipitaciones más fuertes.

7.2.1.2.1. Precipitación

Una vez organizada la información de registros de precipitación mensual por teledetección, se estableció el siguiente régimen pluviométrico:

- Régimen Pluviométrico Bimodal: Caracterizado por presentar dos períodos típicos de lluvias en el año, uno más lluvioso en el primer semestre (marzo a mayo y de octubre a noviembre) y otro menos lluvioso (diciembre a febrero y de junio a septiembre).

Conforme con lo anterior, se evidencia que tanto la información de precipitación obtenida por las 7 estaciones meteorológicas y la suministrada por teledetección, presentan el mismo régimen pluviométrico, demostrando cambios en la cantidad de lluvia (intensidad) de cada mes, siendo los registros de la imagen satelital más altos.

La información detallada de la obtención de la precipitación de la imagen satelital TRRM_3B43 v7 del periodo común de lluvias 1998 al 2018 de la cuenca, se presenta de manera detallada en el anexo E en el archivo denominado "Precipitacion_Media_Cuenca_1998-2018".

7.2.1.2.2. Precipitación media sobre la cuenca

Para el cálculo de la precipitación medida de la cuenca y la precipitación media mensual multianual de la misma, se determinó por medio del programa computacional Excel, a través de los promedios mensual anuales y multianuales, obtenido los siguientes resultados:

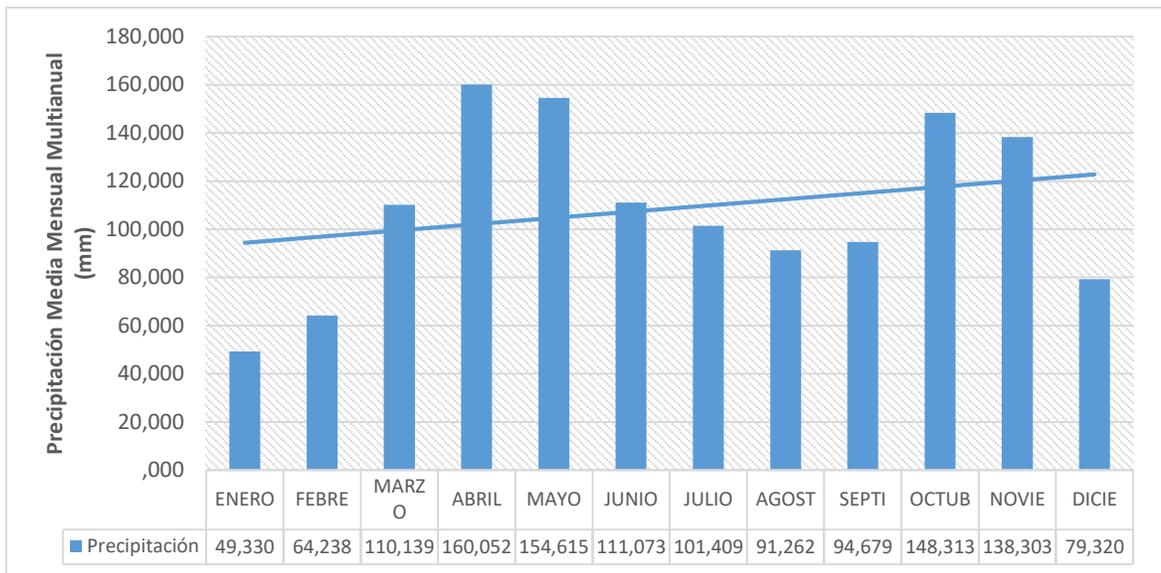
| MES | PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (mm/mes) |
|------------|--|
| Enero | 49,33 |
| Febrero | 64,24 |
| Marzo | 110,14 |
| Abril | 160,05 |
| Mayo | 154,62 |

| MES | PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (mm/mes) |
|-----------------------|--|
| Junio | 111,07 |
| Julio | 101,41 |
| Agosto | 91,26 |
| Septiembre | 94,68 |
| Octubre | 148,31 |
| Noviembre | 138,30 |
| Diciembre | 79,32 |
| TOTAL (mm/año) | 1.302,73 |

Tabla 27. Valores de precipitación media mensual multianual y precipitación media de la cuenca obtenidos del satélite TRMM_3B43 v7 y el procesamiento en el programa Excel – Periodo común 1998-2018.

Fuente: Autores.

Obtenida la precipitación media mensual multianual de la cuenca de Río Checua, se procedió a graficar este parámetro, con el fin de comparar el régimen bimodal determinado por medio de las siete estaciones meteorológicas y descrito anteriormente, evidenciando que coinciden en su totalidad.



Gráfica 16. Precipitación media mensual multianual de la cuenca por el método de teledetección - periodo 1998-2018.

Fuente: Autores.

La precipitación promedio anual de la cuenca del Río Checua por el método de teledetección es de 1.302,73 mm, a nivel temporal cae aproximadamente el 65% de las lluvias en forma de aguaceros torrenciales, en dos épocas del año (marzo-mayo y octubre-noviembre); y un periodo seco (diciembre a febrero y de junio a septiembre) donde cae un 35% del total anual (ver Gráfica 16).

La información detallada de la obtención de la precipitación media mensual multianual de la imagen satelital TRRM_3B43 v7 del periodo común de lluvias 1998 al 2018 de la cuenca, se presenta de manera detallada en el anexo E en el archivo denominado "Precipitacion_Media_Cuenca_1998-2018" respectivamente.

7.2.1.2.3. Temperatura.

Satélite meteorológico MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 del sensor remoto GIOVANNI

Para los fines del estudio, se analizaron los registros de temperatura obtenidos de la imagen satelital MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5, la cual proporcionó una serie de tiempo promedio de área de la tasa de temperatura mensual conforme a las coordenadas geográficas de la cuenca del Río Checua (Ver Tabla 3).

Al ingresar a la página del servidor GIOVANNI y seleccionar los parámetros de búsqueda, se determinó que el satélite MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 seleccionado para la investigación, contaba con una resolución espacial de 0,5° x 0,625° para registros de temperatura de la zona de estudio desde el año 1998 al 2019, siendo esta la resolución más óptima disponible para la descarga de la información de los periodos de temperatura sobre la cuenca del Río Checua.



Ilustración 47. Resultado de la búsqueda en el sensor remoto GIOVANNI para el parámetro de temperatura de la zona de estudio.

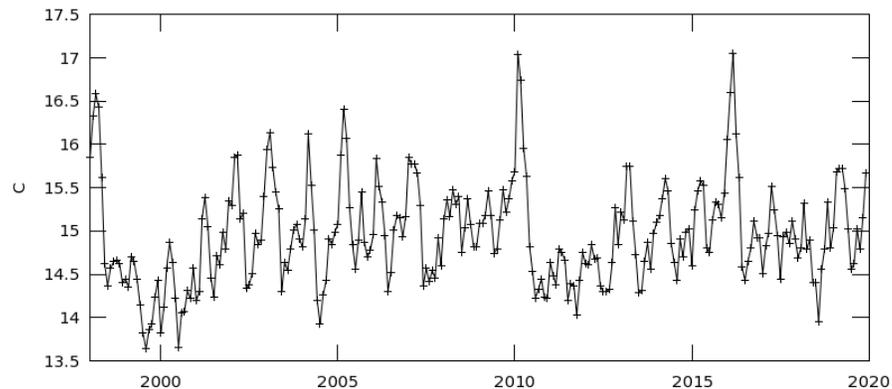
Fuente: [https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=AIRX3STM_006_SurfAirTemp_A%2CM2TMNXFLX_5_12_4_TLML\(units%3DC\)&variableFacets=dataFieldMeasurement%3AAir%20Temperature%3B](https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=AIRX3STM_006_SurfAirTemp_A%2CM2TMNXFLX_5_12_4_TLML(units%3DC)&variableFacets=dataFieldMeasurement%3AAir%20Temperature%3B)

Descargada la información de temperatura del sensor remoto GIOVANNI, se estableció que esta fue obtenida en formatos JPG y CSV (delimitado por comas) – Excel, siendo este último el formato seleccionado para determinar la temperatura

media de la cuenca y temperatura media mensual multianual de la misma (Ver Gráfica 17, Tabla 28 y Anexo E).

Una vez descargado el registro de temperaturas anuales (1998-2018) en formato CSV, se procedió a organizar la información en formato xlsx (hoja de cálculo Excel), en la cual se identificó que no se contaba con datos faltantes y no era necesario hacer ningún ajuste de estos.

Time Series, Area-Averaged of Surface air temperature monthly 0.5 x 0.625 deg. [MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5.12.4] C over 1998-Jan - 2019-Dec, Region 73.56W, 5.13N, 73.47W, 5.4N



- The user-selected region was defined by 73.56W, 5.13N, 73.47W, 5.4N. The data grid also limits the analyzable region to the this point: 73.75W, 5.5N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Gráfica 17. Dispersión de los registros de temperatura del satélite MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 de la zona de estudio de la cuenca del Río Checua por sus coordenadas geográficas.

Fuente: [https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=AIRX3STM_006_SurfAirTemp_A%2CM2TMNXFLX_5_12_4_TLML\(units%3DC\)&variableFacets=dataFieldMeasurement%3AAir%20Temperature%3B](https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=AIRX3STM_006_SurfAirTemp_A%2CM2TMNXFLX_5_12_4_TLML(units%3DC)&variableFacets=dataFieldMeasurement%3AAir%20Temperature%3B)

La Gráfica 17 representa el comportamiento de la temperatura registrada por el satélite meteorológico MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 en un periodo de 21 años (1998 – 2019), con los cuales se puede apreciar la temperatura en °C en cada año, evidenciando el comportamiento de este parámetro en la zona de estudio, así mismo, con esta gráfica se logró establecer la distribución temporal de la

temperatura registradas por el método de teledetección, determinando los años donde se registraron mayores grados (más horas de sol).

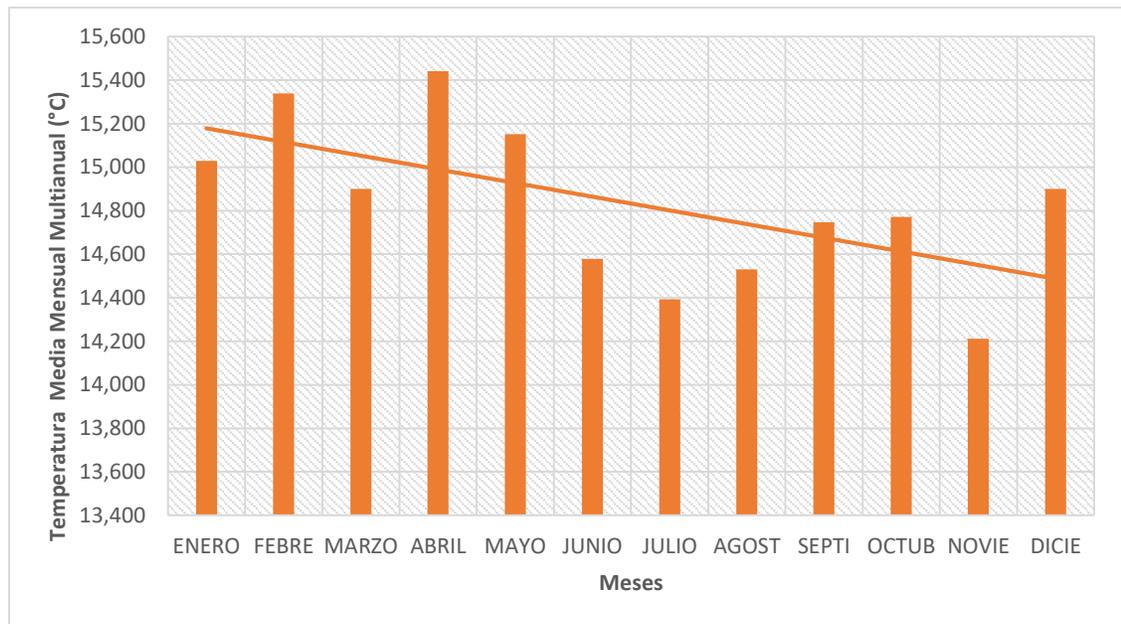
Para el cálculo de la temperatura medida de la cuenca y la temperatura media mensual multianual de la misma, se determinó por medio del programa computacional Excel, a través de los promedios mensual anuales y multianuales, obtenido los siguientes resultados:

| MES | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) |
|------------|--|
| Enero | 15,03 |
| Febrero | 15,34 |
| Marzo | 14,90 |
| Abril | 15,44 |
| Mayo | 15,15 |
| Junio | 14,58 |
| Julio | 14,39 |
| Agosto | 14,53 |
| Septiembre | 14,75 |
| Octubre | 14,77 |
| Noviembre | 14,21 |
| Diciembre | 14,90 |

Tabla 28. Valores de temperatura media mensual multianual obtenidos del satélite meteorológico MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 y el procesamiento en el programa Excel – Periodo común 1998-2018.

Fuente: Autores.

Obtenida la temperatura media mensual multianual de la cuenca de Río Checua, se procedió a graficar este parámetro, con el fin de comparar los registros de la estación Checua (gráfica 8), evidenciando que coinciden en su totalidad en relación a su comportamiento, y variando en pocos grados mes a mes en común.



Gráfica 18. Temperatura media mensual multianual de la cuenca por el método de teledetección - periodo 1998-2018.

Fuente: Autores.

La temperatura media multianual de la cuenca del Río Checua por el método de teledetección es de 14,83°C con pequeñas variaciones que fluctúan entre 15,44°C y 14,21°C, siendo los meses de febrero a mayo y de octubre a noviembre los meses que presentan valores más altos. Los valores medios más bajos se presentan en los meses de enero, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre (Ver Tabla 28 y Gráfica 18).

Ahora bien, respecto al cálculo de los valores de evapotranspiración mensual con registros de temperatura mensual obtenidos por medio del satélite MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 (Tabla 28), estos fueron calculados a través del Método de Thornthwaite, cuyos resultados se presentan en la Tabla 38.

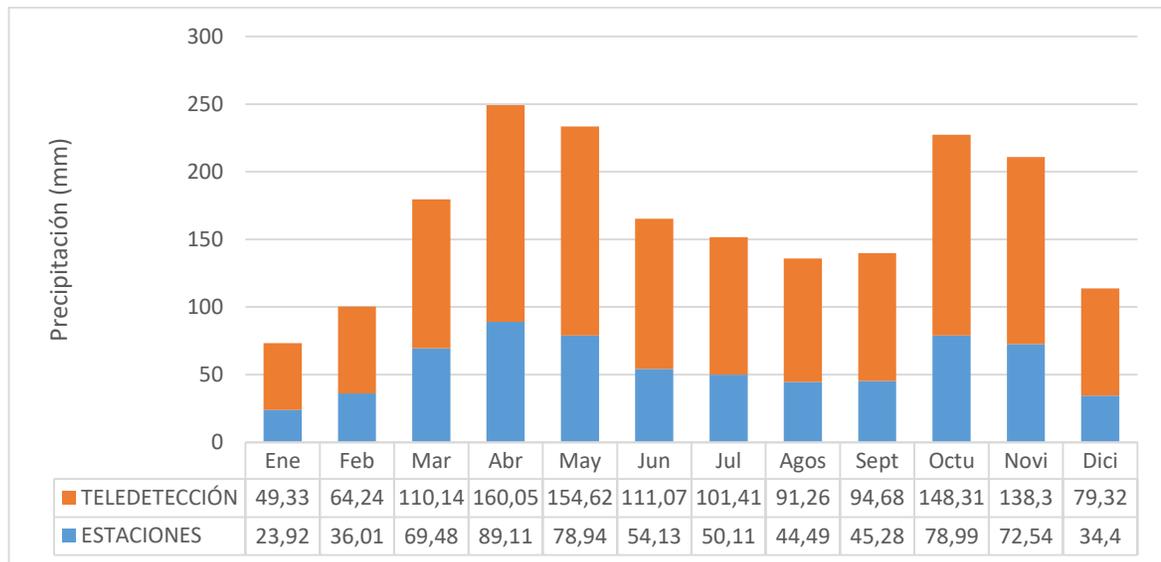
Finalmente, la evapotranspiración real (ETR) fue determinada como resultado final del balance hídrico realizado con información obtenida a través del método de

teledetección, cuyo resultado se reportó en la Tabla 39, y fue comparado y analizado con el balance hídrico reportado en la Tabla 35 (método convencional con periodo común de lluvias 1998 – 2018).

7.2.1.3. Análisis comparativo de la precipitación y temperatura media mensual multianual obtenida de los métodos convencionales y teledetección (periodo de lluvias 1998 – 2018).

Teniendo en cuenta que el análisis de sensibilidad es realizado únicamente con los balances hídricos realizados con los registros de las estaciones meteorológicas y de teledetección para el periodo de lluvias 1998 – 2018, a continuación, se comparan las variables climatológicas obtenidas por ambos métodos, con el fin de determinar las similitudes y diferencias de los datos de entrada del balance y su repercusión en los datos de salida.

- **Precipitación**



Gráfica 19. Comparativo de la Precipitación obtenida por estaciones meteorológicas vs teledetección periodo 1998 - 2018.

Fuente: Autores.

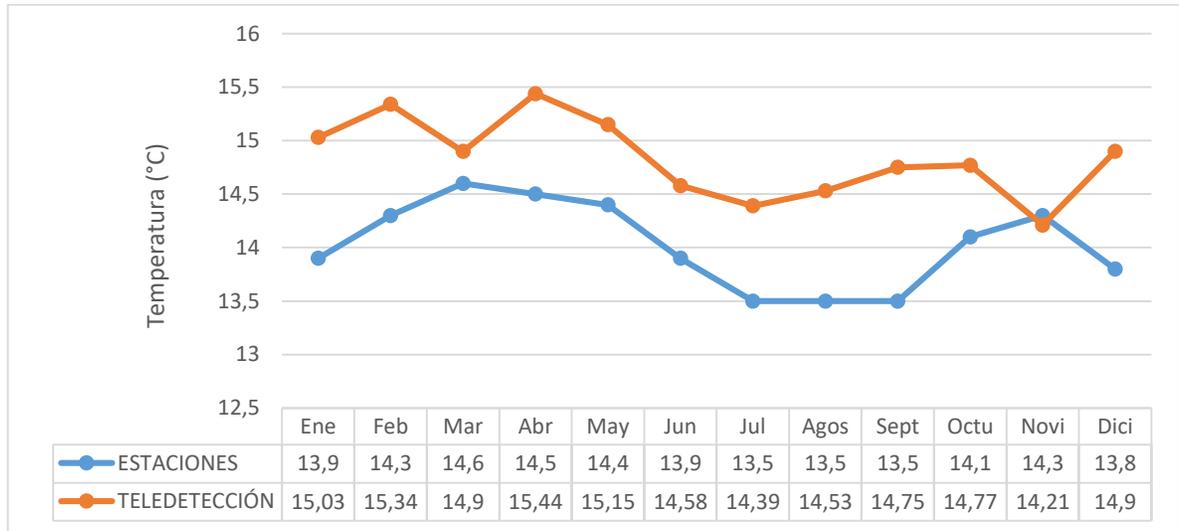
De acuerdo con la gráfica 19, se determinó que tanto los registros de precipitación obtenidos de las siete estaciones meteorológicas y del satélite meteorológico, describen el mismo régimen Pluviométrico Bimodal, caracterizado por presentar dos períodos típicos de lluvias en el año, uno más lluvioso en el primer semestre (marzo a mayo y de octubre a noviembre) y otro menos lluvioso (diciembre a febrero y de junio a septiembre).

No obstante, se evidencia una diferencia del 43% en la cantidad de lluvia precipitada registrada por la ponderación de las siete estaciones meteorológicas, y el satélite meteorológico, toda vez que mes a mes se presenta una diferencia de casi el doble en relación una con la otra, presentando acumulados de 677,39 mm para la información obtenida por método tradicional y de 1.302,73 mm por el método de teledetección.

Conforme con lo anterior, se concluye que a pesar de que los registros de precipitación media mensual multianual, proporcionadas por estaciones meteorológicas y por el sensor remoto TRMM, presentan el mismo comportamiento mensual durante todo el año, las intensidades de lluvia en milímetros (mm) registran una diferencia que afectan de manera considerable los resultados de los balances hídricos por cada método de obtención de información, toda vez que la parámetro climatológico de precipitación es un dato de entrada que condiciona de manera directa el dato de salida.

Finalmente, se puede concluir, que la información climatológica de la variable de precipitación del sensor remoto Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM (información tomada a distancia), no deberá ser la única fuente de información para la realización del balance hídrico por este método de teledetección, teniendo en cuenta que los registros de precipitación obtenidos del procesamiento de los datos de las siete estaciones (información tomada en el lugar), serán la base del análisis de sensibilidad, ya que serán considerados como datos de referencia por la cantidad de información utilizada para la determinación de la precipitación media mensual multianual de la cuenca, razón por la cual, se hace necesario contar con más sensores remotos que registren variables climatológicas y obtener imágenes satelitales con resoluciones espaciales menores a 0,25°.

- **Temperatura**



Gráfica 20. Comparativo de la Temperatura obtenida por estaciones meteorológicas vs teledetección periodo 1998 - 2018.

Fuente: Autores.

Con respecto a la variable climatológica de la temperatura, en la gráfica 20 se representa el comportamiento de este parámetro en el periodo común de lluvias de 1998 – 2018 (20 años), con registros de la estación CHECUA de tipo climatológica principal ubicada dentro de la zona de estudio, y datos obtenidos del satélite MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 (resolución espacial 0,5° x 0,0625°), evidenciando un comportamiento similar de este parámetro, toda vez que en los meses de febrero a mayo y de octubre a noviembre se presentan los valores más altos, y los valores medios más bajos se presentan en los meses de enero, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre, tendencia que coincidiendo con el período más lluvioso, y el más seco respectivamente (ver gráfico 19).

Ahora bien, la diferencia entre los registros de temperatura obtenidos por los métodos de estaciones meteorológicas y teledetección, se evidencian en el cálculo de la evapotranspiración mensual multianual (ver tablas 34 y 38), los cuales, al

considerarse datos de entrada, afectarán los datos de salida de los respectivos balances hídricos. Los registros de temperatura de la estación Checua, serán considerados como de referencia, ya que estos son tomados de manera directa en la zona de estudio, y no a distancia como los del sensor remoto.

Adicionalmente, se determina una diferencia en los grados centígrados registrados por la estación climatológica principal y el satélite meteorológico, toda vez que mes a mes se presentan diferencias en el orden de los 0,09 °C y 1,25 °C en relación una con la otra, presentando temperaturas medias multianuales de 14 °C para la información obtenida por método tradicional y de 14,83 °C por el método de teledetección (diferencia de 0,8°C).

Conforme con lo anterior, se concluye que los registros de temperatura media mensual multianual, proporcionadas por la estación climatológica principal CHECUA y por el satélite MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5, presentan el mismo comportamiento mensual durante todo el año, pero los grados centígrados registran una diferencia que afectan de manera considerable el cálculo de la EPT (20,53 mm de diferencia), y con esta, los resultados de los balances hídricos por cada método de obtención de información, toda vez que la parámetro climatológico de temperatura es un dato de entrada que condiciona de manera directa el dato de salida (EPT).

Finalmente, con los gráficos 19 y 20, ya se puede predecir las diferencias en los resultados de los balances hídricos realizados por el método tradicional (estaciones meteorológicas) y el método de teledetección (sensores remotos – satélites meteorológicos) para el periodo común de lluvias de 20 años (1998 – 2018).

7.3. BALANCES HIDRICOS

El balance hídrico es “*La formulación matemática de la ley de la conservación de la materia, aplicada al agua en un sistema dado*”¹⁰⁴. En forma general, especifica que el total de agua que entra a un sistema debe ser igual al agua que sale de él, más

¹⁰⁴ CLARO R. Francisco A. Balance Hídrico, Fundación Universidad Central, Facultad de Ingeniería en Recursos Hídricos, Bogotá 1.991.

la diferencia entre los contenidos final e inicial (ingreso = egreso + saldo). Así mismo, es una forma de estimar la cantidad de agua que puede presentar una región en un periodo de tiempo determinado. Usando un método numérico se comparan las entradas de agua lluvia con las salidas.

Adicionalmente, el balance hídrico es considerado una herramienta con la cual se define los periodos de disponibilidad (superávit) y déficit del recurso hídrico existente en un área de estudio, este, se basa en información primaria obtenida de registros históricos mensuales multianuales de precipitación total y temperatura media obtenidas de las estaciones meteorológicas de tipo climatológica principal u ordinaria operadas por el IDEAM y la CAR, y/o de imágenes satelitales proporcionadas por diferentes sensores remotos (servidores - satélite meteorológico).

Ahora bien, para la determinación de los tres balances hídricos de la cuenca del Río Checua (dos por el método convencional y uno método teledetección), se empleó la metodología de cálculo propuesta por Thornthwaite (Balance Hídrico Climático – BHC), que consiste en la estimación de las pérdidas de agua mes a mes hasta agotar las reservas existentes en la cuenca, siguiendo el procedimiento indicado en el numeral 4.2.2.1 del aparte de marco de referencias, el cual se resume a continuación.

| Parámetro | Operaciones | Restricciones |
|--|--|--|
| <i>P: precipitación media mensual</i> | P | – |
| <i>ETP: evapotranspiración potencial mensual</i> | ETP | – |
| <i>P – ETP: diferencia entre P y ETP</i> | $P - ETP$ | <i>meses en secos</i> ($P - ETP < 0$) <i>meses húmedos</i> ($P - ETP > 0$) |
| <i>Almacenamiento (R_i)</i> | $R_{i-1} + (P_i - ET_i)$ $R_i = R_{m\acute{a}x}$ $R_i = 0$ | <i>Si</i> $0 < R_{i-1} + (P_i - ET_i) < R_{m\acute{a}x}$ <i>Si</i> $R_{i-1} + (P_i - ET_i) > R_{m\acute{a}x}$ <i>Si</i> $0 > R_{i-1} + (P_i - ET_i)$ |
| <i>Infiltración o Percolación</i> | $I = [P_i - ET_i - VR_i]$ $I = 0$ | <i>Si</i> $(P_i - ET_i) > 0$ <i>Si</i> $(P_i - ET_i) \leq 0$ |
| <i>Utilización del almacenamiento (exceso)</i> | $UA_i = 0$ $UA_i = P_i - ET_i $ | <i>Si</i> $(P_i - ET_i) > 0$ <i>Si</i> $(P_i - ET_i) < 0$ |
| <i>DEF: déficit de agua (D)</i> | $Di = 0$ $Di = ETPi - UA_i$ | <i>Si</i> $(P_i - ET_i) > 0$ <i>Si</i> $(P_i - ET_i) < 0$ |

| Parámetro | Operaciones | Restricciones |
|-------------------------------------|-----------------------|---------------|
| <i>ETR: evapotranspiración real</i> | $ETR_i = ETP_i - D_i$ | – |

Tabla 29. Operaciones y restricciones para el cálculo de los diferentes parámetros del balance hídrico climático.

Fuente: Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México. 2013

Conforme con lo anterior, para la estimación del BHC mensual, se consideró la precipitación como única entrada de agua y la evapotranspiración potencial como la salida de agua de esta en la cuenca, definiendo una capacidad de campo de 50 mm.

- **Precipitación**

Este parámetro se obtuvo de los análisis de intensidades de lluvias, efectuados con base en las cartas de registro mensual de las estaciones existentes en el área de estudio y de las imágenes satelitales obtenidas por la teledetección (sensores remotos) para un periodo común de lluvias de 1988 – 2018 (estaciones meteorológicas) y 1998 – 2018 (estaciones y teledetección), así como de los registros promedio mensual (ver tablas 22, 24 y 27).

- **Evapotranspiración (ETP)**

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, se definió el método de Thornthwaite y Mather (1957), el cual está basado en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura y de la latitud de la zona de estudio y del mes (obtención de número de horas-sol por día).

Los registros de temperatura fueron proporcionados por la estación meteorológica de tipo sinóptica principal denominada CHECUA, ubicada dentro del área de estudio, y la imagen satelital del servidor GIOVANNI (ver tablas 25, 26 y 28), estos valores mensuales se usaron para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) mediante las ecuaciones descritas en el subnumeral 4.2.3.1 del presente documento.

Los cálculos de la evapotranspiración potencial para la estación meteorológica con periodos de lluvia 1988 – 2018 y 1998 – 2018 y por teledetección con periodo de lluvias 1998 – 2018, se presenta de manera detalla en el Anexo F, y resumido en las tablas 31, 34 y 38 respectivamente.

- **Definición de la capacidad de almacenamiento**

Se considera como la cantidad de agua aprovechable por las plantas que puede almacenar el suelo, y depende fundamentalmente de la textura del suelo y de su profundidad.

Para la determinación de la capacidad de almacenamiento del suelo de la cuenca del Río Checua, se tomó como base el estudio realizado por las empresas Planeación Ecológica Ltda., y Ecoforest Ltda., compañías encargadas de la “Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá”, documento de 734 páginas, en la cuales se realizaron balances hídricos cercanos al área de investigación, para los cuales, se supuso una reserva de humedad en el suelo de 50 mm, definida con base en las caracterizaciones de los suelos. Este valor concuerda con suelos francos y francos arcillosos, con humedades disponibles de aproximadamente 20 cm/m de suelo, y profundidad de suelos variable alrededor de los 30 cm¹⁰⁵.

Conforme con lo anterior, y de acuerdo con la geología descrita en el capítulo 4.3 Marco Geográfico de la cuenca del Río Checua del presente documento, las características de los suelos cercanos a la zona de estudio utilizados en la “Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá”, son similares en su estructura, y consecuencia se establece la capacidad de almacenamiento del suelo de la cuenca del Río Checua en 50 mm.

Las pérdidas en el almacenamiento del suelo se calcularon a una tasa proporcional, dependiendo de la fracción de agua almacenada en el suelo; para nuestro estudio supusimos un valor de 50 como capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

¹⁰⁵PLANEACIÓN ECOLÓGICA LTDA. Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá. Bogotá, 2019.

Estas pérdidas se calculan cuando la lluvia es insuficiente para cubrir la demanda de agua (ETP), la cual deja un déficit de agua (ETP-P).

Definidas las variables, se establece el balance hídrico mensual a partir de la precipitación y la evapotranspiración. Los datos de las variables climáticas (precipitación) fueron promediados para cada mes con el fin de obtener un valor representativo de cada una de las estaciones climatológicas en el área de estudio, para el caso de la temperatura y la precipitación obtenida por la teledetección, únicamente se contó con datos de una estación y de una imagen satelital, de las cuales se obtuvieron los valores medios mensuales multianuales.

En base con lo anterior, en el presente trabajo se planteó estimar el balance hídrico climático (BHC) para la cuenca del río Checua del departamento de Cundinamarca – Colombia, utilizando el método directo de Thornthwaite y Mather, con el objetivo de definir los periodos húmedos y secos, así como estimar los excesos de agua, y la parte de escurrimientos subterráneos que drenan hacia los ríos y arroyos (percolación).

Finalmente, se realizaron tres balances hídricos – dos con registros climatológicos de precipitación y temperatura proporcionados por estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del Río Checua, con dos periodos comunes de lluvias, uno de 1988 – 2018 para dar cumplimiento a la norma climática de la Organización Meteorológica Mundial, en lo que se refiere a que los registros de cada estación deben ser de por lo menos de 30 años para el cálculo del Balance Hídrico Climático (BHC), con el fin de brindar mayor consistencia al periodo común de estaciones de 1998 – 2018, con el cual se realizó el segundo balance.

Un tercer balance hídrico con registros de precipitación y temperatura obtenidos por método de teledetección, el cual proporciono un periodo de lluvia de 1998 – 2018, el cual, de acuerdo con el objetivo general del proyecto de investigación, fue comparado con el balance hídrico determinado por registros climatológicos de estaciones meteorológicas con el mismo periodo común de lluvias.

El análisis de sensibilidad de los dos balances hídricos obtenidos por datos de estaciones y teledetección con el mismo periodo común de lluvias se realizó

determinando el balance hídrico por estaciones como referencia, ya que cuenta con un grado de información más completo que los registros de precipitación de la teledetección, y fue comparado con referencias bibliográficas de la zona de estudio.

7.3.1. Método tradicional (estaciones meteorológicas – CAR).

A continuación, se presenta el resultado del procesamiento de la información climatológica obtenida por estaciones meteorológicas y teledetección, con la cual se realizaron los cálculos de la evapotranspiración potencial, y a su vez, con esta información se realizaron los balances hídricos.

7.3.1.1. Periodo común de lluvias 30 años (1988 – 2018)

Los valores de precipitaciones totales y temperaturas medias mensuales multianuales de la cuenca Río Checua, extraídos mediante el procesamiento de los registros de las estaciones meteorológicas, con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica – SIC (ArcGIS) y el programa Excel, se resumen en la siguiente tabla:

| MES | PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) |
|------------|--|--|
| Enero | 23,82 | 13,9 |
| Febrero | 34,95 | 14,4 |
| Marzo | 68,97 | 14,6 |
| Abril | 80,15 | 14,7 |
| Mayo | 75,72 | 14,5 |
| Junio | 49,66 | 14,0 |
| Julio | 52,80 | 13,6 |
| Agosto | 46,45 | 13,6 |
| Septiembre | 44,86 | 13,7 |
| Octubre | 77,50 | 14,1 |
| Noviembre | 74,78 | 14,3 |
| Diciembre | 37,93 | 13,9 |

| MES | PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) |
|-----------------------|---|---|
| TOTAL (mm/Año) | 667,59 | |

Tabla 30. Valores de precipitación total y temperatura media mensual multianual obtenidos por el método de polígonos de THIESSEN y los programas ArcGIS y Excel (30 años).

Fuente: Autores.

Con los registros históricos mensuales multianuales de precipitación total y temperatura media mensuales, se calculó la evapotranspiración por el método directo de Thornthwaite, el cual se registra en la tabla 31.

| EVAPOTRANSPIRACIÓN CUENCA RÍO CHECUA | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Parámetro | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | TOTAL |
| Temperatura media (°C) | 13,93 | 14,37 | 14,64 | 14,72 | 14,52 | 14,01 | 13,57 | 13,60 | 13,71 | 14,05 | 14,32 | 13,93 | 13,9 |
| Índice de Calor (I) | 4,72 | 4,94 | 5,08 | 5,13 | 5,02 | 4,76 | 4,54 | 4,55 | 4,60 | 4,78 | 4,92 | 4,72 | 57,76 |
| Exponente (a) | 1,39 | | | | | | | | | | | | |
| EPT (sin corregir) | 54,87 | 57,32 | 58,82 | 59,28 | 58,19 | 55,33 | 52,94 | 53,09 | 53,66 | 55,56 | 57,07 | 54,90 | 671,02 |
| Corrección por Latitud N5° | | | | | | | | | | | | | |
| # máximo de horas de sol (N) | 12,30 | 12,30 | 12,10 | 12,00 | 11,90 | 11,80 | 11,80 | 11,90 | 12,00 | 12,20 | 12,30 | 12,40 | - |
| Factor de reducción ($f = \frac{N}{12}$) | 1,03 | 1,03 | 1,01 | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 1,00 | 1,02 | 1,03 | 1,03 | - |
| No. del mes (d) | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | 30 | 31 | - |
| n° días del me (d/30) | 1,03 | 0,93 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | - |
| EPT Corregida (mm) | 58,11 | 54,84 | 61,29 | 59,28 | 59,62 | 54,41 | 53,79 | 52,65 | 55,45 | 58,37 | 58,49 | 58,62 | 684,92 |

Tabla 31. Cálculo de la evotranspiración por datos de estaciones meteorológicas de la cuenca del Río Checua – Periodo común 1988-2018

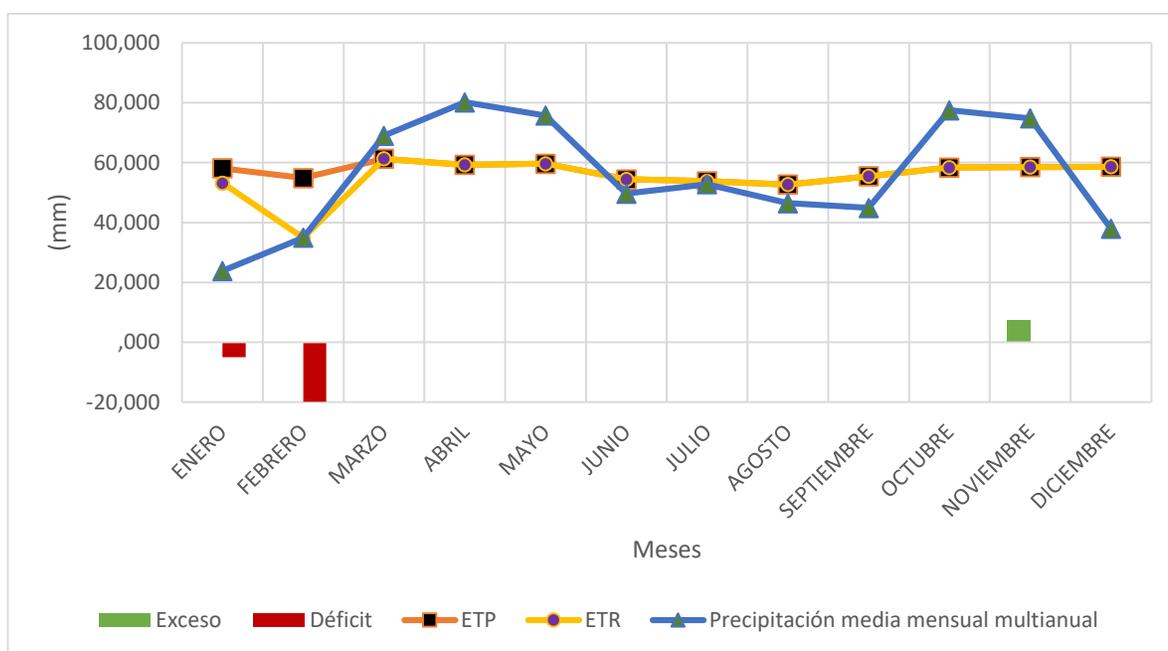
Fuente: Autores.

Ahora bien, con los valores mensuales de evapotranspiración corregida de la cuenca del Río Checua, se procede a elaborar el balance hídrico de esta, estableciendo el mes de inicio en marzo, toda vez que en el referido mes la $P > ETP$.

| BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO (BHC) - METODO DIRECTO | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|
| BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA | | | | | | | | | | | | | |
| Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo : 50 mm | | | | | | | | | | | | | |
| PARAMETRO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | TOTAL |
| PRECIPITACIÓN | 23,82 | 34,95 | 68,97 | 80,15 | 75,72 | 49,66 | 52,80 | 46,45 | 44,86 | 77,50 | 74,78 | 37,93 | 667,59 |
| ETP | 58,11 | 54,84 | 61,29 | 59,28 | 59,62 | 54,41 | 53,79 | 52,65 | 55,45 | 58,37 | 58,49 | 58,62 | 684,92 |
| $\Delta (P-ETP)$ | -34,29 | -19,88 | 7,68 | 20,87 | 16,10 | -4,75 | -0,99 | -6,21 | -10,59 | 19,13 | 16,28 | -20,69 | |
| ALMACENAMIENTO | 0,00 | 0,00 | 7,68 | 28,56 | 44,65 | 39,91 | 38,92 | 32,71 | 22,12 | 41,25 | 50,00 | 29,31 | |
| PERCOLACIÓN | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 7,54 | 0,00 | 7,54 |
| UTILIZACIÓN ALMACENAMIENTO (exceso) | -29,31 | 0,00 | 7,68 | 20,87 | 16,10 | -4,75 | -0,99 | -6,21 | -10,59 | 19,13 | 8,75 | -20,69 | 0,00 |
| DEFICIT | -4,98 | -19,88 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 24,86 |
| ETR (mm) | 53,13 | 34,95 | 61,29 | 59,28 | 59,62 | 54,41 | 53,79 | 52,65 | 55,45 | 58,37 | 58,49 | 58,62 | 660,06 |

Tabla 32. Balance Hídrico de la cuenca del Río Checua – Método estaciones meteorológicas (30 años).

Fuente: Autores



Gráfica 21. Balance hídrico cuenca del Río Checua por método tradicional periodo 1988 – 2018 (30 años)

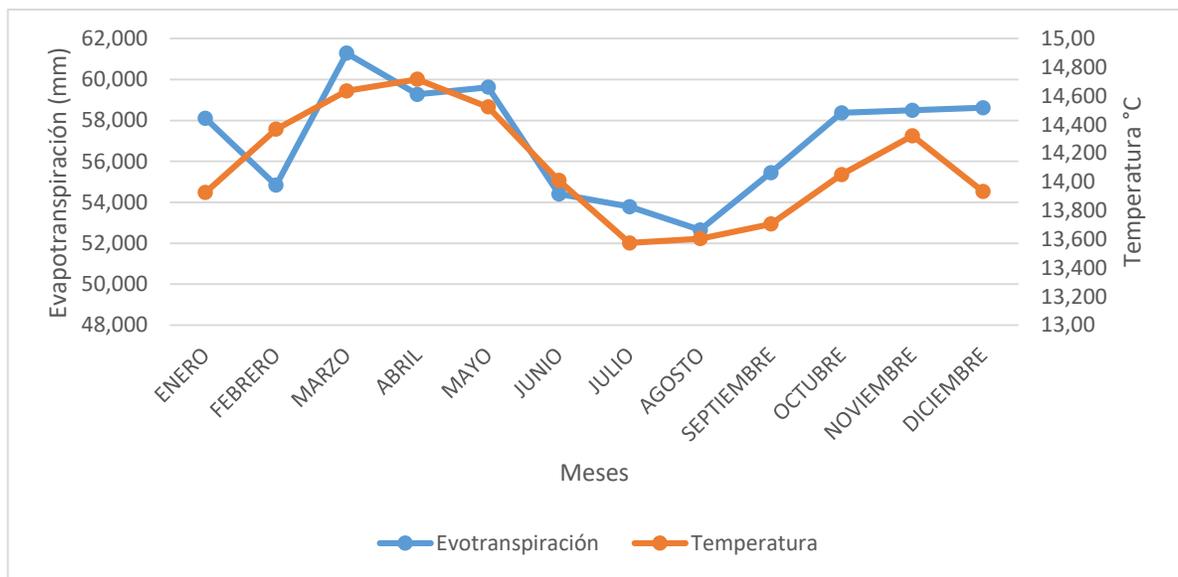
Fuente: Autores.

En la gráfica 21, se presentan los resultados del balance hídrico mensual multianual de la cuenca del Río Checua para el periodo de lluvias de 1988 al 2018, en este se aprecia un régimen climatológico bimodal con temporadas de lluvia entre los meses de marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, siendo este último, donde existe un exceso debido a las precipitaciones registradas, lo cual permite el aporte para las aguas superficiales y subterráneas de los meses de diciembre y enero. Respecto a las temporadas secas, estas se determinan en el primer semestre del año, exactamente en los meses de enero y febrero y en los meses de junio, julio, agosto y septiembre correspondientes al segundo semestre, lo que genera una condición de déficit en el balance hídrico en los meses mencionados, siendo los meses de enero y febrero los únicos que no les fue posible cubrir su respectivo déficit.

Adicionalmente, el suelo presenta un cierto grado de exceso de agua cuando la precipitación es principalmente alta y la evapotranspiración baja. Lo anterior confirma que existe un aumento de los excesos de agua conforme aumenta la precipitación en la zona.

Ahora bien, la duración de los periodos de déficits o excesos hídricos en una cuenca, dependen de la configuración local y regional de los factores climáticos y fisiográficos que hacen variar la evapotranspiración y la precipitación. Es por ello que dentro de una cuenca podrían darse periodos de déficit y/o exceso de agua en diferentes regiones con diferentes tiempos de duración¹⁰⁶. Lo anterior, se puede observar en el efecto que tiene la temperatura (factor climático) sobre la evapotranspiración durante el periodo seco y húmedo en la cuenca del río Checua. Donde durante en el periodo seco con el aumento de la temperatura la evapotranspiración aumenta, resultando en mayores pérdidas de agua del suelo (enero, febrero, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre), mientras que, en el periodo húmedo (marzo, abril, mayo, octubre y noviembre), conforme la temperatura disminuye la evapotranspiración sigue el mismo comportamiento, disminuyendo la salida de agua en la cuenca (ver Gráfica 22).

¹⁰⁶ RUIZ, A. O.; ARTEAGA, R. R.; VAZQUEZ, P. M. A.; LOPEZ, L. R.; ONTIVEROS, C. R. E. Requerimiento de riego y predicción del rendimiento en gramíneas forrajeras mediante un modelo de simulación en Tabasco, México. *Agrociencia*, v. 45, p. 745-760, 2011.



Gráfica 22. Evapotranspiración potencial vs temperatura media mensual multianual por método tradicional periodo 1988 – 2018 (30 años)

Fuente: Autores.

En cuanto a los procesos y sus respectivos periodos identificados en base al BHC son los siguientes: entre los meses de marzo, abril, mayo octubre y noviembre se presenta la recarga de humedad por la precipitación, el exceso de agua únicamente en el mes de noviembre, y la utilización de la humedad en los meses de junio, julio, agosto, septiembre, diciembre y enero (Gráfica 21).

Obtenido el balance hídrico para el periodo de 30 años, se procedió a verificar el cierre del balance comparando lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{ENTRADAS = SALIDAS} \\
 & \mathbf{PRECIPITACIÓN = INFILTRACIÓN + ETR} \\
 & 667,59 \text{ mm} = 7,54 \text{ mm} + 660,06 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{667,59 \text{ mm} = 667,59 \text{ mm}}
 \end{aligned}$$

Adicionalmente, de los resultados de balance hídrico climático se estimó el porcentaje de recarga al acuífero:

$$\frac{\text{Percolación}}{\text{Precipitación}} \rightarrow \left(\frac{7,54 \text{ mm}}{667,59 \text{ mm}} \right) \times 100 = 1,13\%$$

En resumen, los resultados arrojados por el BHC realizado en la cuenca del río Checua, muestra una precipitación promedio anual de 667,59 mm, una evapotranspiración potencial promedio anual de 684,92 mm, un déficit promedio anual de 24,86 mm, un exceso de agua promedio anual (percolación) de 7,54 mm y una evapotranspiración real promedio anual 660,06 mm. Por último, comprobando el BHC, se tiene que si se cumple la igualdad de los valores anuales entre la evapotranspiración real más el exceso de agua (percolación), y la precipitación, pues la sumatoria de ambas operaciones aritméticas da la misma cantidad de 667,59 mm, con lo cual se confirma que el BHC realizado en la cuenca es correcto (Tabla 32).

Finalmente, para determinar si los cálculos del balance hídrico fueron realizados de manera satisfactoria, se utilizó la aplicación "InnerSoft ISBH V 0.9", la cual es usada para realizar el cálculo del balance hídrico del suelo y hallar la clasificación climática de Thornthwaite. Los resultados se presentan a continuación.

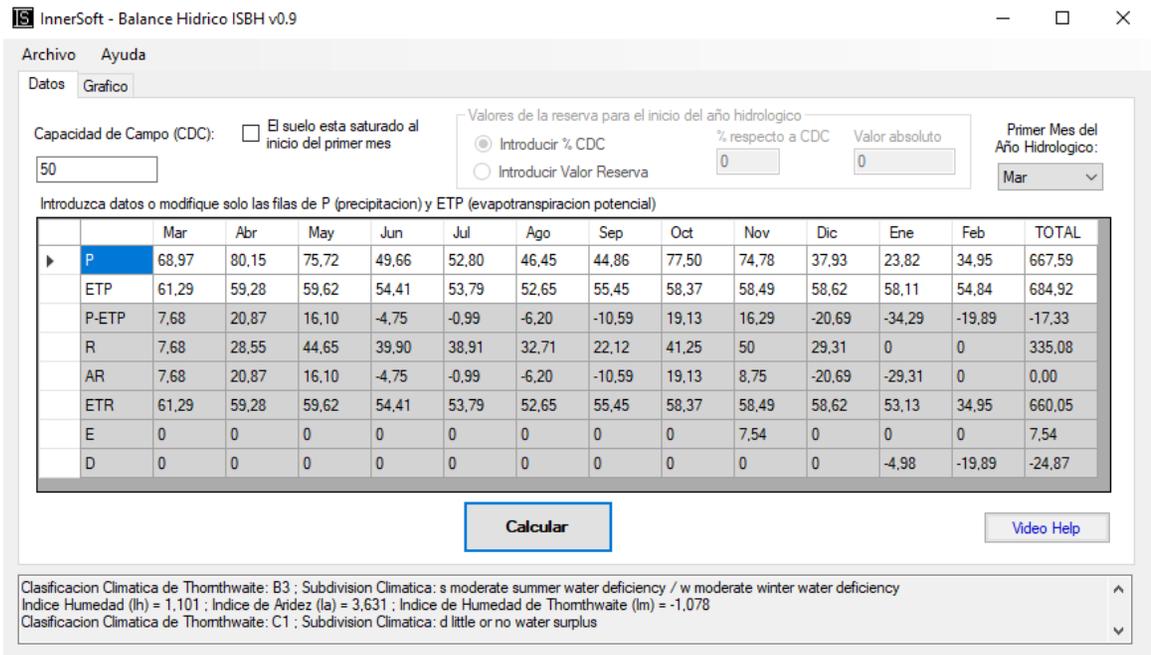
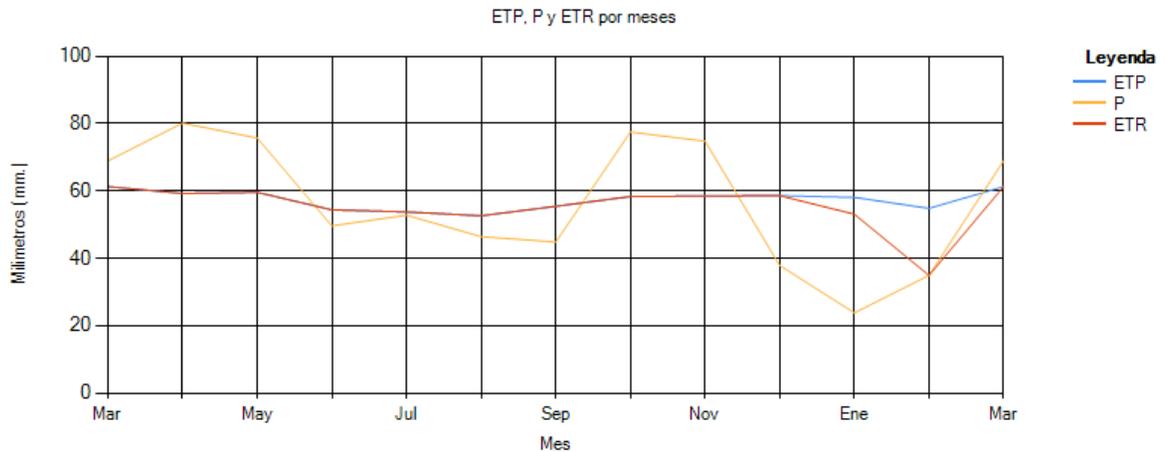
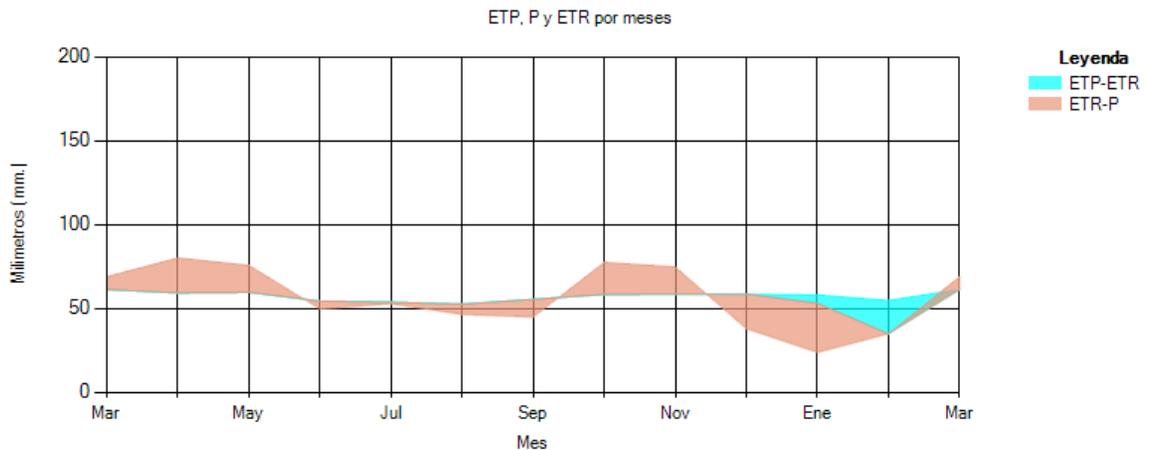


Ilustración 48. Balance Hídrico de la cuenca del Río Checua – Método estaciones meteorológicas (30 años) - Programa InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9.
 Fuente: Autores





Gráfica 23. Representación del balance hídrico climático por el método de tradicional (30 años) de la cuenca del Río Checua - Programa InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9.

Fuente: Autores.

Con respecto a los resultados obtenidos por el programa InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9. (Ilustración 47 y Gráfica 23), se establece que, en los meses de enero a febrero, la ETP es mayor a la ETR, en los meses de marzo a diciembre la ETP es igual a la ETR, y en los meses (color rojo) de enero, febrero y diciembre la ETP es mayor a la precipitación, lo que indica que el suelo no tiene reservas de agua y toda la precipitación se convierte en ETR, siendo diciembre el único mes al que le fue posible cubrir el déficit que presentaba. Con estos resultados y al comparar la Tabla 32 con la Ilustración 47, y la Gráfica 21 con el 23, se determina que los BHC realizados con el programa Excel y el aplicativo InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9., arrojan los mismos resultados.

7.3.1.2. Periodo común de lluvias 20 años (1998 – 2018)

Los valores de precipitaciones totales y temperaturas medias mensuales multianuales de la cuenca Río Checua, extraídos mediante el procesamiento de los registros de las estaciones meteorológicas, con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica – SIC (ArcGIS) y el programa Excel, se resumen en la siguiente tabla:

| MES | PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) |
|-----------------------|---|---|
| Enero | 23,92 | 13,9 |
| Febrero | 36,01 | 14,3 |
| Marzo | 69,48 | 14,6 |
| Abril | 89,11 | 14,5 |
| Mayo | 78,94 | 14,4 |
| Junio | 54,13 | 13,9 |
| Julio | 50,11 | 13,5 |
| Agosto | 44,49 | 13,5 |
| Septiembre | 45,28 | 13,5 |
| Octubre | 78,99 | 14,1 |
| Noviembre | 72,54 | 14,3 |
| Diciembre | 34,40 | 13,8 |
| TOTAL (mm/Año) | 677,39 | |

Tabla 33. Valores de precipitación total y temperatura media mensual multianual obtenidos por el método de polígonos de THIESSEN y los programas ArcGIS y Excel (20 años).

Fuente: Autores.

Con los registros históricos mensuales multianuales de precipitación total y temperatura media mensuales, se calculó la evapotranspiración por el método directo de Thornthwaite, el cual se registra en la tabla 34.

| EVAPOTRANSPIRACIÓN CUENCA RÍO CHECUA | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Parámetro | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | TOTAL |
| Temperatura media (°C) | 13,90 | 14,33 | 14,57 | 14,54 | 14,43 | 13,90 | 13,51 | 13,48 | 13,51 | 14,07 | 14,31 | 13,85 | 13,8 |
| Índice de Calor (I) | 4,70 | 4,92 | 5,05 | 5,04 | 4,98 | 4,70 | 4,51 | 4,49 | 4,50 | 4,79 | 4,92 | 4,68 | 57,27 |
| Exponente (a) | 1,39 | | | | | | | | | | | | |
| EPT (sin corregir) | 55,03 | 57,38 | 58,74 | 58,58 | 57,96 | 55,00 | 52,89 | 52,68 | 52,86 | 55,95 | 57,30 | 54,71 | 669,09 |
| Corrección por Latitud N5° | | | | | | | | | | | | | |
| # máximo de horas de sol (N) | 12,30 | 12,30 | 12,10 | 12,00 | 11,90 | 11,80 | 11,80 | 11,90 | 12,00 | 12,20 | 12,30 | 12,40 | - |
| Factor de reducción ($f = \frac{N}{12}$) | 1,03 | 1,03 | 1,01 | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 1,00 | 1,02 | 1,03 | 1,03 | - |
| No. del mes (d) | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | 30 | 31 | - |
| n° días del me (d/30) | 1,03 | 0,93 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | - |
| EPT Corregida (mm) | 58,29 | 54,89 | 61,20 | 58,58 | 59,40 | 54,09 | 53,74 | 52,24 | 54,63 | 58,78 | 58,73 | 58,42 | 682,98 |

Tabla 34. Cálculo de la Evotranspiración por datos de estaciones meteorológicas de la cuenca del Río Checua – Periodo común 1998-2018

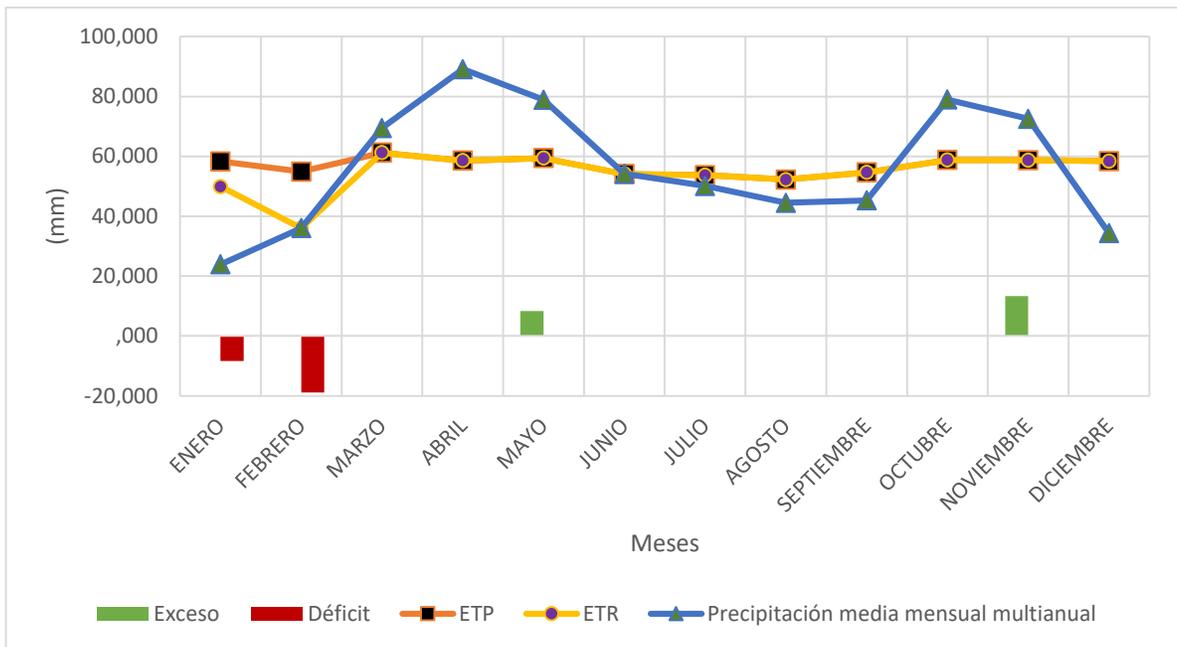
Fuente: Autores.

Ahora bien, con los valores mensuales de evapotranspiración corregida de la cuenca del Río Checua, se procede a elaborar el balance hídrico de esta, estableciendo el mes de inicio en marzo, toda vez que en el referido mes la $P > ETP$.

| BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO (BHC) - METODO DIRECTO | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA | | | | | | | | | | | | | |
| Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo : 50 mm | | | | | | | | | | | | | |
| PARAMETRO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | TOTAL |
| PRECIPITACIÓN | 23,92 | 36,01 | 69,48 | 89,11 | 78,94 | 54,13 | 50,11 | 44,49 | 45,28 | 78,99 | 72,54 | 34,40 | 677,39 |
| ETP | 58,29 | 54,89 | 61,20 | 58,58 | 59,40 | 54,09 | 53,74 | 52,24 | 54,63 | 58,78 | 58,73 | 58,42 | 682,98 |
| $\Delta (P-ETP)$ | -34,37 | -18,88 | 8,28 | 30,53 | 19,55 | 0,05 | -3,63 | -7,76 | -9,35 | 20,21 | 13,81 | -24,03 | |
| ALMACENAMIENTO | 0,00 | 0,00 | 8,28 | 38,81 | 50,00 | 50,00 | 46,37 | 38,61 | 29,26 | 49,47 | 50,00 | 25,97 | |
| PERCOLACIÓN | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 8,35 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 13,28 | 0,00 | 21,68 |
| UTILIZACIÓN ALMACENAMIENTO (exceso) | -25,97 | 0,00 | 8,28 | 30,53 | 11,19 | 0,00 | -3,63 | -7,76 | -9,35 | 20,21 | 0,53 | -24,03 | 0,00 |
| DEFICT | -8,40 | -18,88 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 27,28 |
| ETR (mm) | 49,89 | 36,01 | 61,20 | 58,58 | 59,40 | 54,09 | 53,74 | 52,24 | 54,63 | 58,78 | 58,73 | 58,43 | 655,70 |

Tabla 35. Balance Hídrico de la cuenca del Río Checua – Método estaciones meteorológicas (20 años) – Programa Excel.

Fuente: Autores.



Gráfica 24. Balance hídrico cuenca del Río Checua por método convencional periodo 1998 – 2018 (20 años)

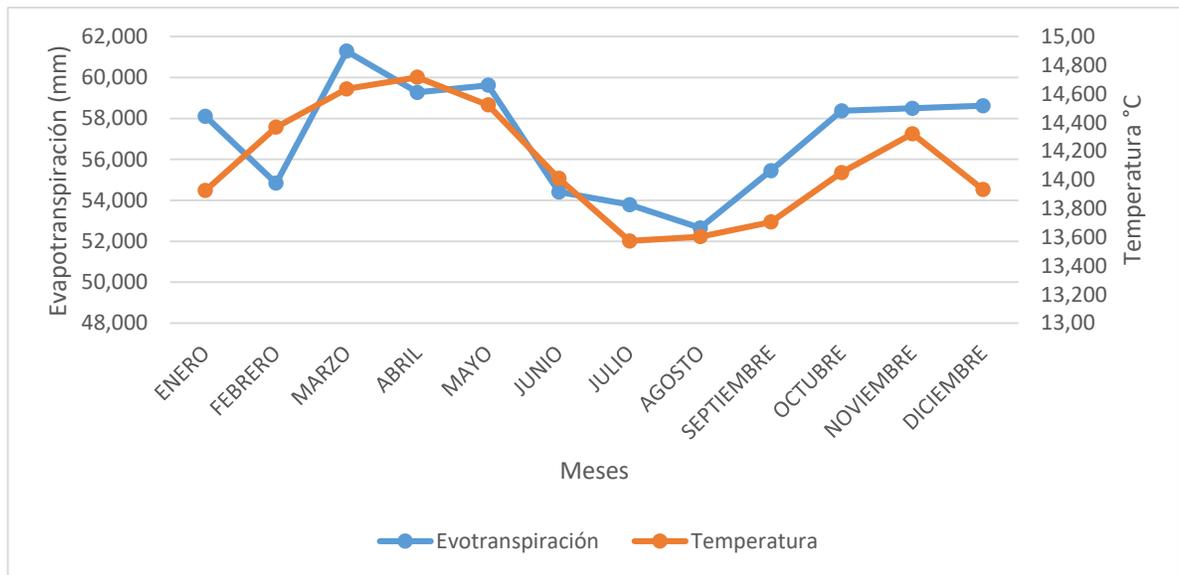
Fuente: Autores.

En la gráfica 24, se presentan los resultados del balance hídrico mensual multianual de la cuenca del Río Checua para el periodo de lluvias de 1998 al 2018, en este se aprecia un régimen climatológico bimodal con temporadas de lluvia entre los meses de marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, siendo los meses de mayo y noviembre, donde existe un exceso debido a las precipitaciones registradas, lo cual permite el aporte para las aguas superficiales y subterráneas de los meses de julio, agosto, septiembre y diciembre y enero. Respecto a las temporadas secas, estas se determinan en el primer semestre del año, exactamente en los meses de enero y febrero y en los meses de junio, julio, agosto y septiembre correspondientes al segundo semestre, lo que genera una condición de déficit en el balance hídrico en los meses mencionados, siendo los meses de enero y febrero los únicos que no les fue posible cubrir su respectivo déficit.

Adicionalmente, como se mencionó en el BHC del periodo de 1988 al 2018, el suelo presenta un cierto grado de exceso de agua cuando la precipitación es principalmente alta y la evapotranspiración baja. Lo anterior confirma que existe un aumento de los excesos de agua conforme aumenta la precipitación en la zona.

Ahora bien, la duración de los periodos de déficits o excesos hídricos en una cuenca, dependen de la configuración local y regional de los factores climáticos y fisiográficos que hacen variar la evapotranspiración y la precipitación. Es por ello que dentro de una cuenca podrían darse periodos de déficit y/o exceso de agua en diferentes regiones con diferentes tiempos de duración¹⁰⁷. Lo anterior, se puede observar en el efecto que tiene la temperatura (factor climático) sobre la evapotranspiración durante el periodo seco y húmedo en la cuenca del río Checua. Donde durante en el periodo seco con el aumento de la temperatura la evapotranspiración aumenta, resultando en mayores pérdidas de agua del suelo (enero, febrero, julio, agosto, septiembre y diciembre), mientras que, en el periodo húmedo (marzo, abril, mayo, junio, octubre y noviembre), conforme la temperatura disminuye la evapotranspiración sigue el mismo comportamiento, disminuyendo la salida de agua en la cuenca (ver Gráfica 25).

¹⁰⁷ Ibid



Gráfica 25. Evapotranspiración potencial vs temperatura media mensual multianual por método convencional periodo 1998 – 2018 (20 años)

Fuente: Autores.

En cuanto a los procesos y sus respectivos periodos identificados en base al BHC son los siguientes: entre los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y noviembre se presenta la recarga de humedad por la precipitación, el exceso de agua únicamente en los meses de mayo, junio y noviembre, y la utilización de la humedad en los meses de julio, agosto, septiembre, diciembre y enero (Gráfica 24).

Obtenido el balance hídrico para el periodo de 20 años, se procedió a verificar el cierre del balance comparando lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \text{ENTRADAS} = \text{SALIDAS} \\
 & \text{PRECIPITACIÓN} = \text{INFILTRACIÓN} + \text{ETR} \\
 & 677,39 \text{ mm} = 21,68 \text{ mm} + 655,70 \text{ mm} \rightarrow 677,39 \text{ mm} = 677,39 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Adicionalmente, de los resultados de balance hídrico climático se estimó el porcentaje de recarga al acuífero:

$$\frac{\text{Percolación}}{\text{Precipitación}} \rightarrow \left(\frac{21,68 \text{ mm}}{677,39 \text{ mm}} \right) \times 100 = 3,20\%$$

En resumen, los resultados arrojados por el BHC realizado en la cuenca del río Checua, muestra una precipitación promedio anual de 677,39 mm, una evapotranspiración potencial promedio anual de 682,98 mm, un déficit promedio anual de 27,28 mm, un exceso de agua promedio anual (percolación) de 21,68 mm y una evapotranspiración real promedio anual 682,98 mm. Por último, comprobando el BHC, se tiene que si se cumple la igualdad de los valores anuales entre la evapotranspiración real más el exceso de agua (percolación), y la precipitación, pues la sumatoria de ambas operaciones aritméticas da la misma cantidad de 677,39 mm, con lo cual se confirma que el BHC realizado en la cuenca es correcto (Tabla 35).

Finalmente, para determinar si los cálculos del balance hídrico fueron realizados de manera satisfactoria, se utilizó la aplicación "InnerSoft ISBH V 0.9", la cual es usada para realizar el cálculo del balance hídrico del suelo y hallar la clasificación climática de Thornthwaite. Los resultados se presentan a continuación.

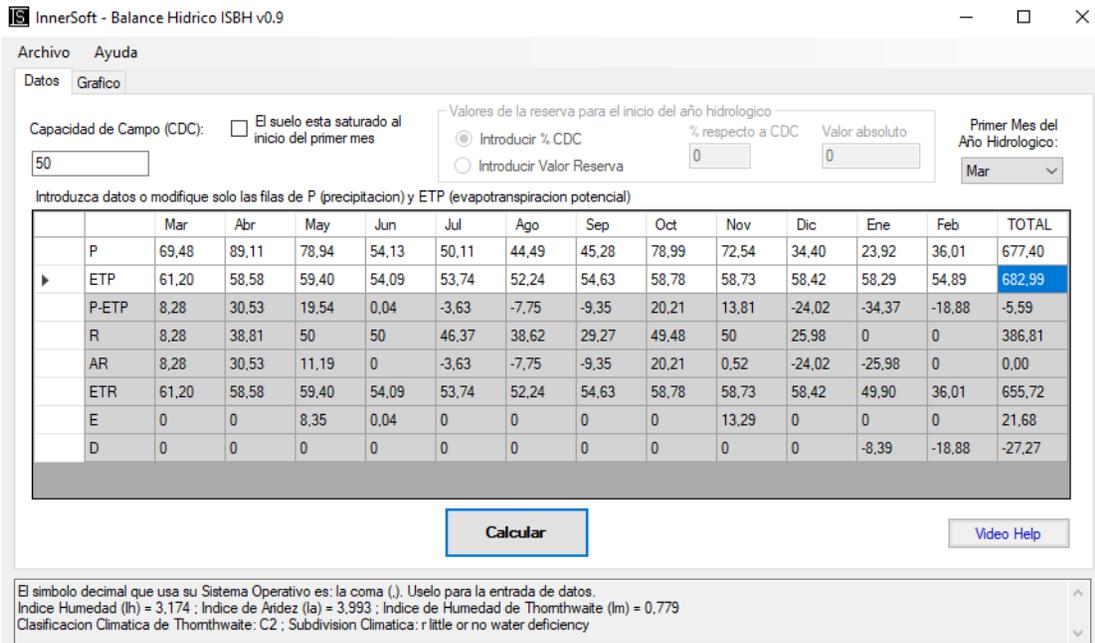
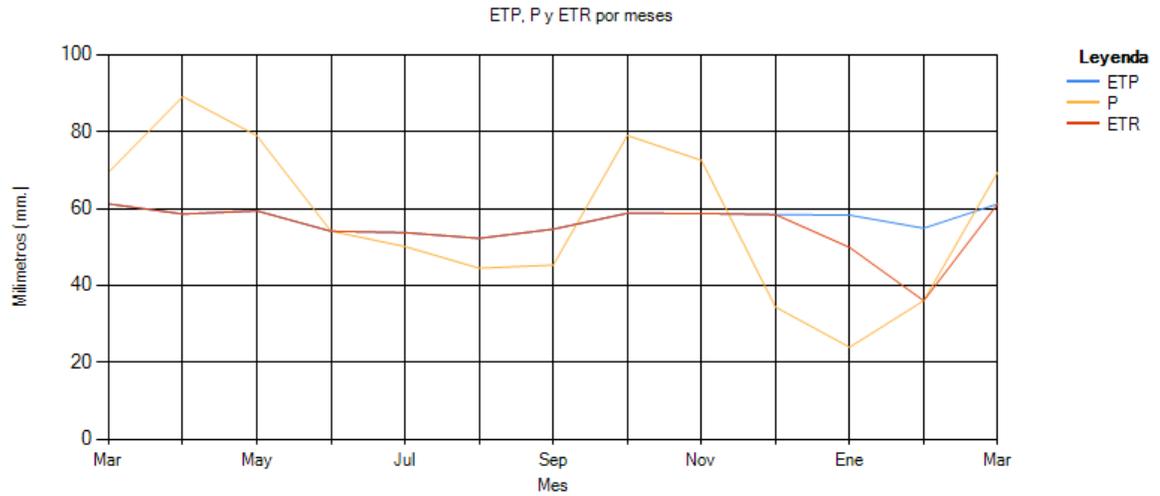
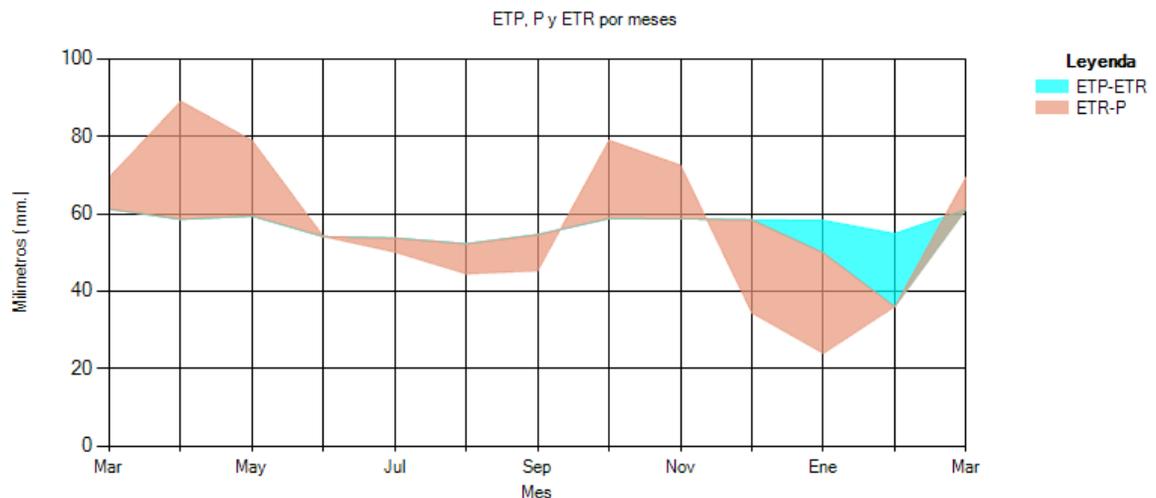


Ilustración 49. Balance Hídrico de la cuenca del Río Checua – Método estaciones meteorológicas (20 años) - Programa InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9.

Fuente: Autores





Gráfica 26. Representación del balance hídrico climático por el método tradicional (20 años) de la cuenca del Río Checua - Programa InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9.

Fuente: Autores.

Con respecto a los resultados obtenidos por el programa InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9. (Ilustración 48 y Gráfica 26), se establece que, en los meses de enero a febrero, la ETP es mayor a la ETR, en los meses de marzo a diciembre la ETP es igual a la ETR, y en los meses (color rojo) de enero, febrero y diciembre la ETP es mayor a la precipitación, lo que indica que el suelo no tiene reservas de agua y toda la precipitación se convierte en ETR, siendo diciembre el único mes al que le fue posible cubrir el déficit que presentaba. Con estos resultados y al comparar la Tabla 35 con la Ilustración 48, y la Gráfica 24 con el 26, se determina que los BHC realizados con el programa Excel y el aplicativo InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9., arrojan los mismos resultados.

En conclusión, se evidencia que el BHC para un periodo de 30 años, se comporta de manera idéntica con el BHC para el periodo de 20 años en lo referente a los periodos secos y húmedos y meses donde se presenta percolación y déficit, presentando cambios únicamente en la intensidad medida en milímetros de las variables de entrada y salida.

7.3.2. Método por teledetección (sensores remotos – satélite – TRRM)

Los valores de precipitaciones totales y temperaturas medias mensuales multianuales de la cuenca Río Checua, extraídos mediante el procesamiento de los registros de las imágenes satelitales (teledetección) con la ayuda del programa Excel, se resumen en la siguiente tabla:

| MES | PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL DE LA CUENCA (°C) |
|-----------------------|--|--|
| Enero | 49,33 | 15,03 |
| Febrero | 64,24 | 15,34 |
| Marzo | 110,14 | 14,90 |
| Abril | 160,05 | 15,44 |
| Mayo | 154,62 | 15,15 |
| Junio | 111,07 | 14,58 |
| Julio | 101,41 | 14,39 |
| Agosto | 91,26 | 14,53 |
| Septiembre | 94,68 | 14,75 |
| Octubre | 148,31 | 14,77 |
| Noviembre | 138,30 | 14,21 |
| Diciembre | 79,32 | 14,90 |
| TOTAL (mm/Año) | 1.302,73 | |

Tabla 36. Valores de precipitación y temperatura media mensual multianual obtenidos de los satélites TRMM_3B43 v7 y MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 y el procesamiento de los datos en el programa Excel – Periodo común 1988-2018

Fuente: Autores.

Con los registros históricos mensuales multianuales de precipitación total y temperatura media mensuales, se calculó la evapotranspiración por el método directo de Thornthwaite, el cual se registra en la Tabla 38.

| EVAPOTRANSPIRACIÓN CUENCA RÍO CHECUA | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Parámetro | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | TOTAL |
| Temperatura media (°C) | 15,03 | 15,34 | 14,90 | 15,44 | 15,15 | 14,58 | 14,39 | 14,53 | 14,75 | 14,77 | 14,21 | 14,90 | 14,83 |
| Índice de Calor (I) | 5,29 | 5,46 | 5,22 | 5,51 | 5,36 | 5,05 | 4,96 | 5,03 | 5,14 | 5,16 | 4,86 | 5,22 | 62,27 |
| Exponente (a) | 1,47 | | | | | | | | | | | | |
| EPT (sin corregir) | 58,55 | 60,33 | 57,81 | 60,93 | 59,25 | 55,98 | 54,94 | 55,71 | 56,94 | 57,08 | 53,92 | 57,81 | 689,23 |
| Corrección por Latitud N5° | | | | | | | | | | | | | |
| # máximo de horas de sol (N) | 12,30 | 12,30 | 12,10 | 12,00 | 11,90 | 11,80 | 11,80 | 11,90 | 12,00 | 12,20 | 12,30 | 12,40 | - |
| Factor de reducción ($f = \frac{N}{12}$) | 1,03 | 1,03 | 1,01 | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 1,00 | 1,02 | 1,03 | 1,03 | - |
| No. del mes (d) | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | 30 | 31 | - |
| n° días del me (d/30) | 1,03 | 0,93 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | 1,03 | 1,00 | 1,03 | - |
| EPT Corregida (mm) | 62,01 | 57,71 | 60,23 | 60,93 | 60,72 | 55,05 | 55,82 | 55,24 | 58,83 | 59,96 | 55,27 | 61,73 | 703,51 |

Tabla 37. Cálculo de la Evotranspiración por datos de teledetección de la cuenca del Río Checua (20 años).

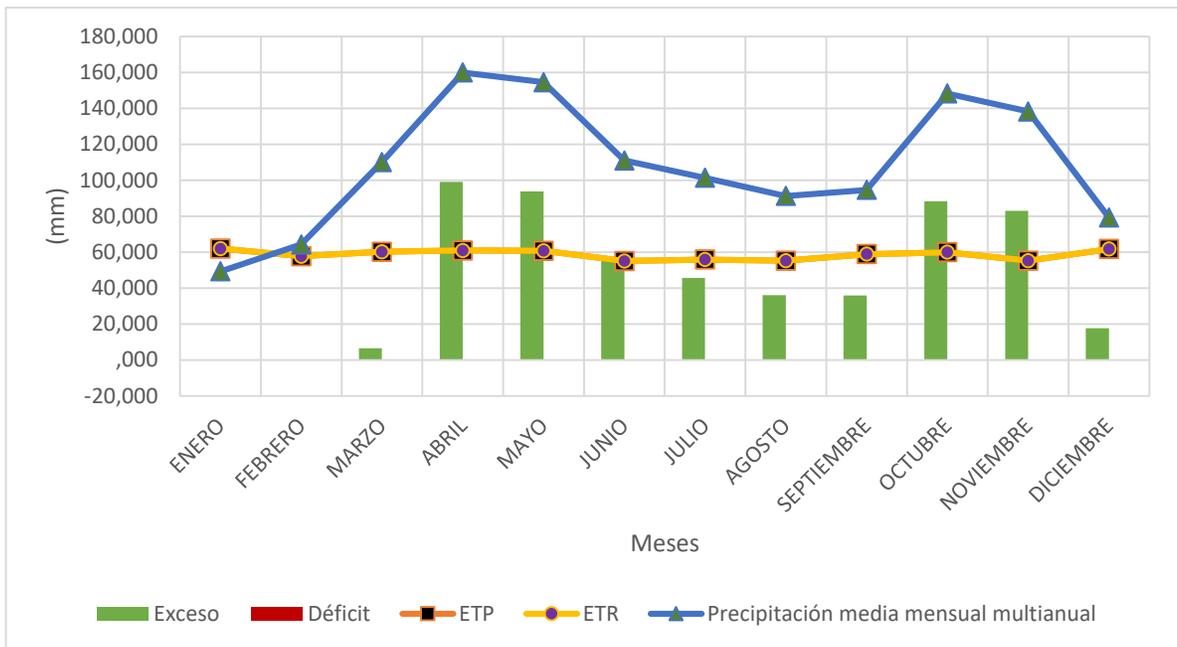
Fuente: Autores.

Ahora bien, con los valores mensuales de evapotranspiración corregida de la cuenca del Río Checua, se procede a elaborar el balance hídrico de esta, estableciendo el mes de inicio en febrero, toda vez que en el referido mes la $P > ETP$.

| BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO (BHC) - METODO DIRECTO | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|---------|
| BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA | | | | | | | | | | | | | |
| Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo: 50 mm | | | | | | | | | | | | | |
| PARAMETRO | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | TOTAL |
| PRECIPITACIÓN | 49,33 | 64,24 | 110,14 | 160,05 | 154,62 | 111,07 | 101,41 | 91,26 | 94,68 | 148,31 | 138,30 | 79,32 | 1302,73 |
| ETP | 62,01 | 57,71 | 60,23 | 60,93 | 60,72 | 55,05 | 55,82 | 55,24 | 58,83 | 59,96 | 55,27 | 61,73 | 703,51 |
| $\Delta (P-ETP)$ | -12,68 | 6,52 | 49,91 | 99,13 | 93,90 | 56,03 | 45,59 | 36,02 | 35,84 | 88,35 | 83,03 | 17,59 | |
| ALMACENAMIENTO | 37,32 | 6,52 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | |
| PERCOLACIÓN | 0,00 | 0,00 | 6,43 | 99,13 | 93,90 | 56,03 | 45,59 | 36,02 | 35,84 | 88,35 | 83,03 | 17,59 | 561,91 |
| UTILIZACIÓN ALMACENAMIENTO (exceso) | -12,68 | 6,52 | 43,48 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 37,32 |
| DEFICIT | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ETR (mm) | 62,01 | 57,71 | 60,23 | 60,93 | 60,72 | 55,05 | 55,82 | 55,24 | 58,83 | 59,96 | 55,27 | 61,73 | 703,50 |

Tabla 38. Balance Hídrico de la cuenca del Río Checua – Método Teledetección (20 años) – Programa Excel.

Fuente: Autores.



Gráfica 27. Balance hídrico cuenca del Río Checua por método teledetección periodo 1998 – 2018 (20 años)

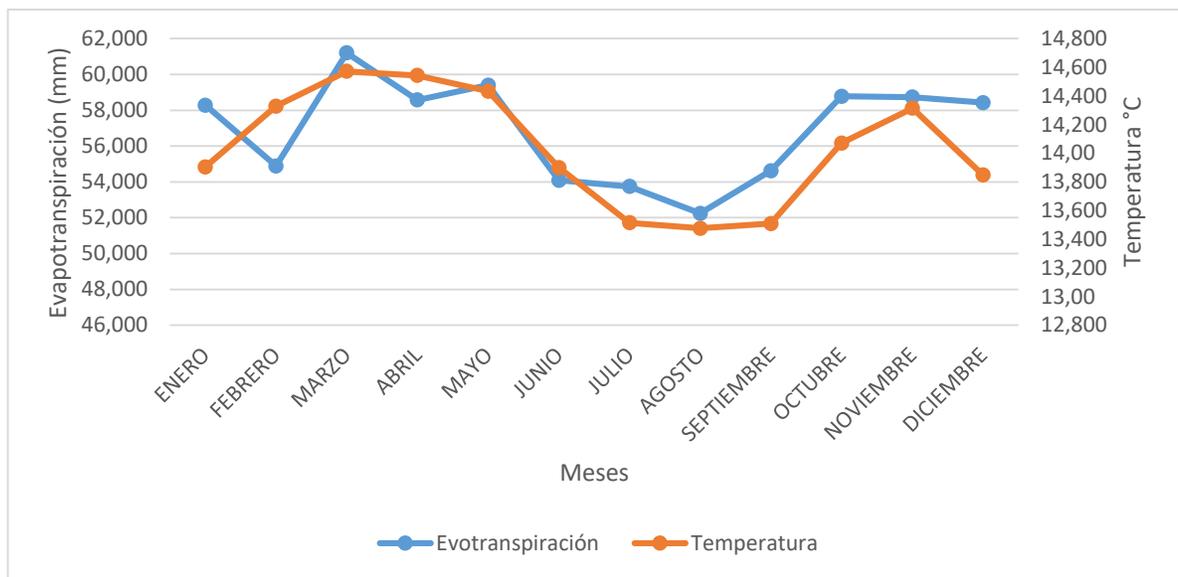
Fuente: Autores.

En la gráfica 27, se presentan los resultados del balance hídrico mensual multianual de la cuenca del Río Checua para el periodo de lluvias de 1998 al 2018, en este se aprecia un régimen climatológico bimodal con temporadas de lluvia entre los meses de marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, siendo estos meses, donde existe excesos debido a las precipitaciones registradas, lo cual permite el aporte para las aguas superficiales y subterráneas de los meses de enero y febrero. Respecto a las temporadas secas, estas se determinan en el primer semestre del año, exactamente en los meses de enero y febrero y en los meses de junio, julio, agosto y septiembre correspondientes al segundo semestre, sin embargo, a pesar de considerarse meses con precipitaciones bajas, no se evidencian déficit en la cuenca, toda vez que, en diez de los doce meses del año, se contó con almacenamiento en exceso, lo que permitió cumplir con el déficit de los meses de enero y febrero.

Adicionalmente, como se ha mencionado en los BHC anteriores, el suelo presenta un cierto grado de exceso de agua cuando la precipitación es principalmente alta y la evapotranspiración baja. Lo anterior confirma que existe un aumento de los excesos de agua conforme aumenta la precipitación en la zona.

Ahora bien, la duración de los periodos de déficits o excesos hídricos en una cuenca, dependen de la configuración local y regional de los factores climáticos y fisiográficos que hacen variar la evapotranspiración y la precipitación. Es por ello que dentro de una cuenca podrían darse periodos de déficit y/o exceso de agua en diferentes regiones con diferentes tiempos de duración¹⁰⁸. Para el caso de la BHC realizado con datos suministrados por el método de teledetección, se puede observar, el efecto que tiene la temperatura (factor climático) sobre la evapotranspiración durante el periodo seco y húmedo en la cuenca del río Checua. Donde durante en el periodo seco con el aumento de la temperatura la evapotranspiración aumenta, resultando en mayores pérdidas de agua del suelo (enero), mientras que, en el periodo húmedo (febrero a diciembre), conforme la temperatura disminuye la evapotranspiración sigue el mismo comportamiento, disminuyendo la salida de agua en la cuenca (ver Gráfica 27).

¹⁰⁸ Ibid



Gráfica 28. Evapotranspiración potencial vs temperatura media mensual multianual por método de teledetección periodo 1998 – 2018 (20 años)

Fuente: Autores.

En cuanto a los procesos y sus respectivos periodos identificados en base al BHC son los siguientes: entre los meses de febrero a diciembre se presenta la recarga de humedad por la precipitación, el exceso de agua únicamente en los meses de marzo a diciembre, y la utilización de la humedad en el mes enero (Gráfica 27).

Con forme con lo anterior, y al hecho que no exista un déficit de agua durante el periodo seco, se evidencia que esto, es debido a que la evapotranspiración generada en la cuenca si bien no es cubierta por el agua que cae de la precipitación, alcanza a cubrir sus necesidades por la cantidad de agua que se tiene en las reservas del suelo durante los meses de marzo a diciembre, los cuales no llegan a ser menores a 50 mm (Tabla 39). La cantidad de exceso de agua acumulado a lo largo del año es de 561,91 mm. Esta cantidad indica el exceso de humedad en el suelo presente en la cuenca del río Checua determinada con sensores remotos (satélites meteorológicos), el cual se va generando mes a mes una cantidad de agua que el suelo va almacenando y reteniendo, hasta exceder la reserva máxima o

capacidad de campo para generar el escurrimiento superficial.

Obtenido el balance hídrico para el periodo de 20 años, se procedió a verificar el cierre del balance comparando lo siguiente:

$$\begin{aligned} \mathbf{ENTRADAS} &= \mathbf{SALIDAS} \\ \mathbf{PRECIPITACIÓN} &= \mathbf{INFILTRACIÓN} + \mathbf{ETR} \\ 1.302,73 \text{ mm} &= 599,23 \text{ mm} + 703,50 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{1.302,73 \text{ mm} = 1.302,73 \text{ mm}} \end{aligned}$$

Adicionalmente, de los resultados de balance hídrico climático se estimó el porcentaje de recarga al acuífero:

$$\frac{\text{Percolación}}{\text{Precipitación}} \rightarrow \left(\frac{561,91 \text{ mm}}{1.302,73 \text{ mm}} \right) \times 100 = 43,13\%$$

En resumen, los resultados arrojados por el BHC realizado en la cuenca del río Checua, muestra una precipitación promedio anual de 1.302,73 mm (casi el doble de la precipitación promedio anual obtenida de estaciones meteorológicas 677,39 mm), una evapotranspiración potencial promedio anual de 703,51 mm, un déficit promedio anual de 0 mm, un exceso de agua promedio anual (percolación) de 561,91 mm y una evapotranspiración real promedio anual 703,50 mm. Por último, comprobando el BHC, se tiene que si se cumple la igualdad de los valores anuales entre la evapotranspiración real más el exceso de agua (percolación), y la precipitación, pues la sumatoria de ambas operaciones aritméticas da la misma cantidad de 1.302,51 mm, con lo cual se confirma que el BHC realizado en la cuenca es correcto (Tabla 39).

Finalmente, para determinar si los cálculos del balance hídrico fueron realizados de manera satisfactoria, se utilizó la aplicación "InnerSoft ISBH V 0.9", la cual es usada para realizar el cálculo del balance hídrico del suelo y hallar la clasificación climática de Thornthwaite. Los resultados se presentan a continuación.

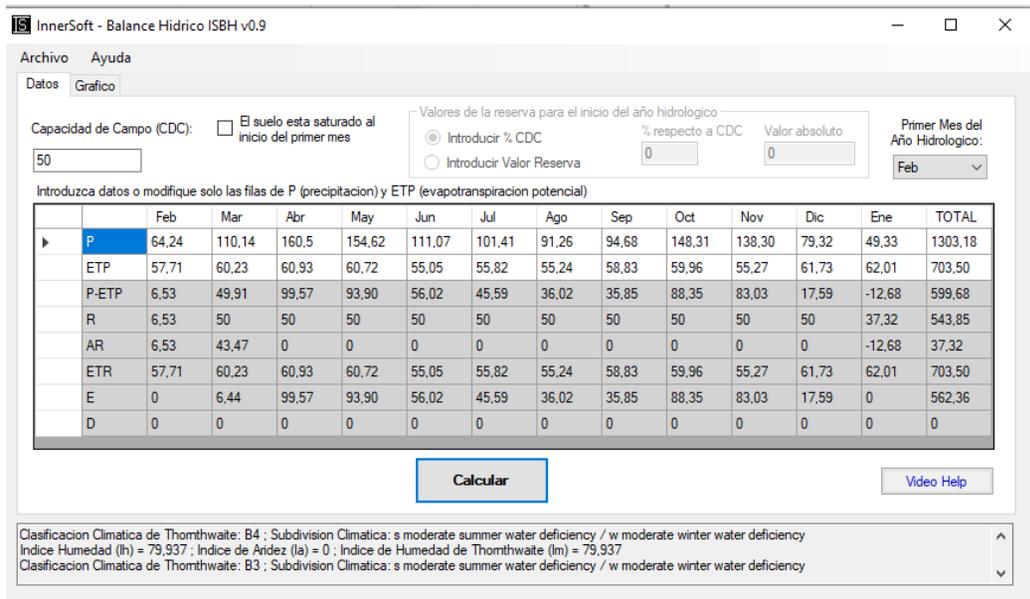
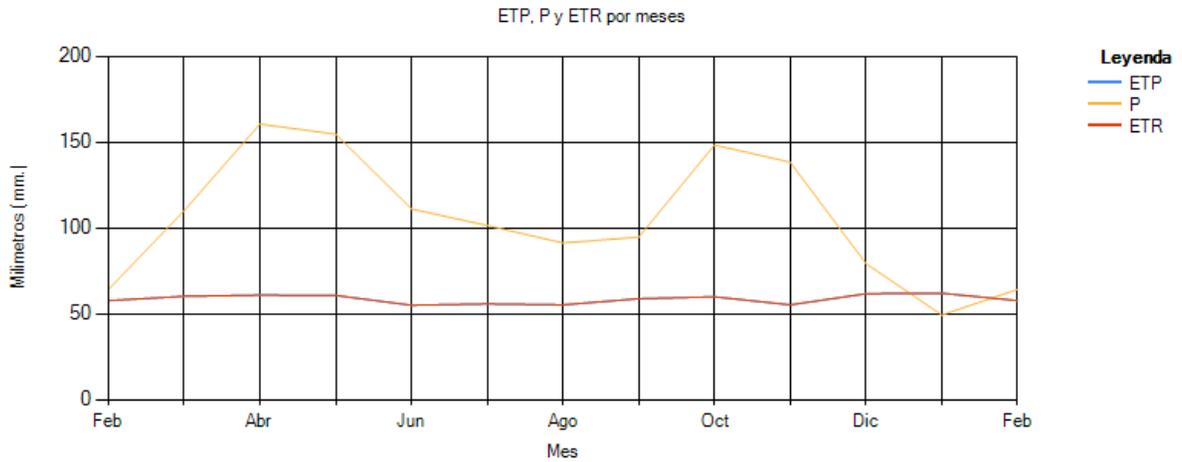
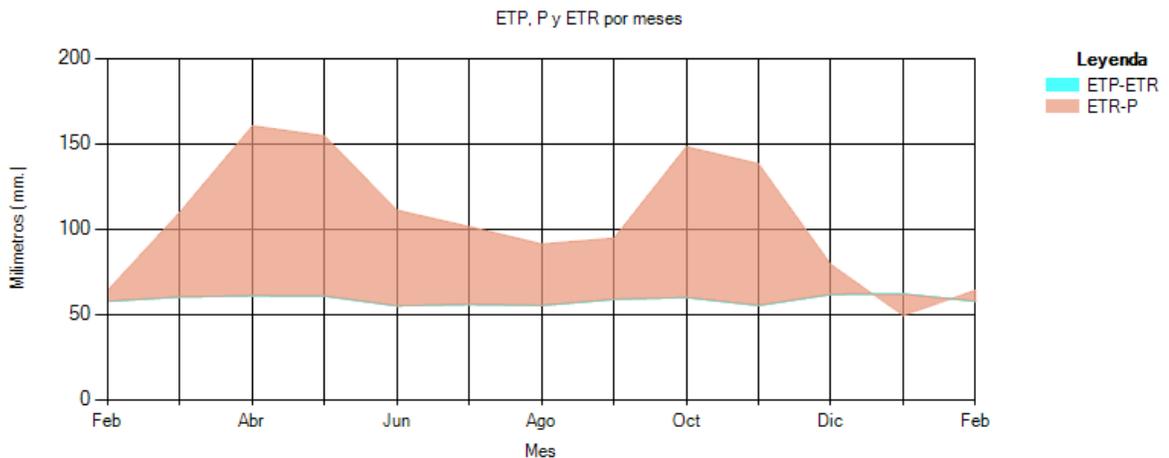


Ilustración 50. Balance Hídrico de la cuenca del Río Checua – Método teledetección (20 años) - Programa InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9.
 Fuente: Autores





Gráfica 29. Representación del balance hídrico climático por el método de teledetección de la cuenca del Río Checua - Programa InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9.

Fuente: Autores

Con respecto a los resultados obtenidos por el programa InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9. (Ilustración 49 y Gráfica 29), se establece que, en ningún mes la ETP es mayor a la ETR, es mas en todos los meses la ETP es igual a la ETR, y en el mes (color rojo) de enero la ETP es mayor a la precipitación, lo que indica que el suelo no tiene reservas de agua y toda la precipitación se convierte en ETR, sin embargo, con la capacidad de almacenamiento de diciembre, se logró cubrir el déficit que se presentaba. Los demás meses (febrero a diciembre) en color rojo, demostraron que la precipitación fue mayor que la ETR, razón por la cual, se determina que, de los 12 meses, en 10 la cuenca presenta una capacidad de almacenamiento máximo, lo que evita déficit en la cuenca y un buen porcentaje de recarga del acuífero. Con estos resultados y al comparar la Tabla 39 con la Ilustración 49, y la Gráfica 27 con la 29, se determina que los BHC realizados con el programa Excel y el aplicativo InnerSoft – Balance Hídrico ISBH v0.9., arrojan los mismos resultados.

Con los resultados obtenidos del BHC por el método de teledetección para un periodo de 20 años, y de acuerdo con las condiciones climáticas de la zona

determinadas con información obtenida de manera directa (campo) y comparadas con investigaciones previas realizadas en la cuenca del río Checua, se determina que los resultados arrojados por este método, discrepan de manera considerable con la realidad de la cuenca del Río Checua, toda vez que el área establecida para la investigación, es considerada una cuenca con suelos erosivos, poca vegetación, falta de oferta en el recurso hídricos, y es calificada un acuífero con bajo porcentaje de recarga, características climáticas e hidrológicas que si coinciden con el BHC realizado por el método tradicional (estaciones meteorológicas).

7.3.3. Comparación resultados del BHC por método tradicional vs método de teledetección – Periodo común 1998 – 2018.

Como inicio para realizar la comparación de los resultados obtenidos de los BHC para un periodo de lluvias común de 20 años (1998 – 2018), por los métodos de estaciones meteorológicas y de sensores remotos, es importante comenzar hablando de las variables de entrada del balance, las cuales son la precipitación y temperatura (insumo para calcular la evotranspiración potencial - variable de entrada), parámetros climatólogos que de acuerdo a las gráficas 19 y 20, presentan el mismo comportamiento temporal a lo largo del año. Para la precipitación, un régimen bimodal que se comporta igual en los mismos meses de ambos registros históricos de información, pero con cambios considerables en las intensidades de lluvias medidas en milímetros, los cuales afectan los resultados de los BHC. En cuanto a la temperatura, la cual fue obtenida de una única estación climatológica principal y una imagen satelital, igualmente presentan un comportamiento similar para ambos métodos de obtención de información durante los 12 meses, cuyos valores no presentan un cambio brusco en grados centígrados, en consecuencia, la variable de entrada (evapotranspiración potencial) obtenida de este parámetro no presentó una diferencia tan marcada como la precipitación (Tabla 39).

| PARAMETRO | BHC ESTACIONES (mm) | BHC TELEDETECCIÓN (mm) | DIFERENCIA (mm) |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Precipitación | 677,39 | 1.302,73 | 625,34 |
| ETP | 682,98 | 703,51 | 20,53 |
| Percolación | 21,68 | 561,91 | 540,23 |

| PARAMETRO | BHC ESTACIONES (mm) | BHC TELEDETECCIÓN (mm) | DIFERENCIA (mm) |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Déficit | 27,28 | 0,00 | 0,00 |
| ETR | 655,70 | 703,70 | 48,00 |

Tabla 39. Diferencias representativas de los BHC por el método de estaciones y de teledetección.

Fuente: Autores.

Ahora bien, con la información resumida de los resultados de los BHC presentados en la tabla 39, se determina que, entre ambos balances, se presenta una diferencia considerable en las variables de entrada, las cuales son proporcionadas por estaciones meteorológicas e imágenes satelitales, las cuales impactan de gran manera los datos de salida de cada balance.

Al comparar ambos balances hídricos, se evidencia un comportamiento totalmente diferente en las variables de salida, ya que la percolación para el BHC con información de estaciones es apenas de 21,68 mm lo que permite determinar que la cuenca no dispone de una cantidad considerable de aguas lluvias almacenadas en exceso en el suelo, información que coincide con la bibliografía de la zona de estudio investigada, caso contrario con la percolación resultante del BHC con registros históricos obtenidos de un sensor remoto (satélite meteorológicos), la cual establece 561,91 mm de exceso en la capacidad de almacenamiento del suelo de la cuenca del Río Checua, lo cual genera que en esta no se presente ningún mes con déficit y que la cuenca permanezca saturada, contradiciendo la información climatológica e hidrológica de la zona de estudio.

Aunado con lo anterior, con el BHC de estaciones, se establece que la cuenca presenta un déficit de 27,28 mm, lo que permite determinar que el porcentaje de recarga es bajo (3%), y que no dispone de agua almacenada en el suelo, situación que genera caudales mínimos de escorrentía, caudales medios mensuales que se encuentran el orden de 0,13 m³/s de acuerdo a los registros de la estación climatológica principal CHECUA, ahora, los caudales según el BHC por teledetección, al no contar con meses con déficit en el suelo, y presentar suelos saturados, se puede concluir que la cuenca presentará caudales muy grandes y un porcentaje de recarga del acuífero (43%) muy superior, comparado con el del BHC

determinado por el método tradicional.

Ahora bien, en relación con la ETR, el BHC por método tradicional arrojó un valor de 655,70 mm para este parámetro y de 682,98 mm de ETP (ETP > ETR), con lo cual se determina que el 96,78% de las lluvias (677,39 mm) son consumidas en procesos de evaporación y transpiración de las plantas, razón por la cual la cuenca no cuenta con suelos saturados en su capacidad de almacenamiento ni con escorrentía superficial considerables, en cambio el BHC por el método de teledetección, presenta una ETR de 703,70 mm y una ETP de 703,51 mm, siendo estas muy similares, ya que la cuenca no cuenta con déficit, toda vez que, de la precipitación total mensual multianual (1.302,73 mm), solo el 54,08% es consumido por la plantas por medio de los proceso de evaporación y transpiración, con lo cual la zona de estudio presentaría suelos totalmente saturadas y escorrentía superficial considerable.

En conclusión, se evidencia que el BHC para un periodo de 20 años calculado con información satelital meteorológica, se comporta de manera distinta con el BHC para el periodo de 20 años calculado con estaciones meteorológicas, en lo referente a los periodos secos y húmedos, cantidades de precipitación, ETP, ETR y los meses donde se presenta percolación y déficit, presentando cambios únicamente en la intensidad medida en milímetros de las variables de entrada y salida.

7.4. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Partiendo que la información climatológica y los resultados del balance hídrico climático – BHC de los registros de estaciones meteorológicas, serán tomados como la base para analizar los datos y resultados obtenidos por el método de teledetección, a continuación, se desarrolló el análisis de sensibilidad, con el cual se pretendió a través de un análisis cualitativo determinar el nivel de confianza, en el modelo de teledetección en relación al modelo de estaciones metrológicas, para finalmente determinar su robustez.

Conforme con lo anterior, por medio del método de selección (proporciona medidas cualitativas) el cual es una de clases para desarrollar un modelo de sensibilización, se procedió a identificar los paramentos que afectaron las salidas de los balances

hídricos climáticos por estaciones y teledetección.

- **Variables de entrada:**

Precipitación:

El parámetro climatológico de precipitación es considerado una de las variables de entrada más significativas, toda vez que, con esta se da inicio al balance hídrico climatológico, y es la que define el mes en que se da inicio al balance ($P > ETP$), para finalmente definir los meses de déficit y superávit de la cuenca, así como la cantidad de agua precipitada que se convirtió en evapotranspiración real.

A continuación, se describe de manera cualitativa los parámetros identificados dentro de cada método de obtención de información meteorológica, que afectaron de manera favorable o negativa los datos de salida

Estaciones meteorológicas:

- Las siete estaciones meteorológicas administradas por la CAR, se encuentra ubicadas dentro del área de la cuenca del río Checua (**favorable**).
- Las siete estaciones meteorológicas presentan una elevación promedio de 2.800m, lo que permite obtener mejores correlaciones entre ellas, y datos más homogéneos, así mismo, de acuerdo con esta característica topográfica, se cuenta con similares condiciones climáticas y de paisaje (**favorable**).
- Las siete estaciones meteorológicas en total presentaron 165 datos vacíos en los registros mensuales para el periodo de 20 años definido entre 1998 – 2018 (**negativo**).
- Una vez efectuado el llenado de datos vacíos por el método IDW y determinar su correlación por dobles masas (0,90), se obtuvieron en total 1.764 registros para la variable climatológica de precipitación (**favorable**).
- Las siete estaciones presentaron una disponibilidad de información de más

de 20 años, las cuales se encuentran activas a la fecha de elaboración del presente proyecto de investigación (**favorable**).

- Al validar la estructura de los registros de datos de cada estación, se comprobó que tanto las estructuras de cada registro, como el valor de cada dato, fuera el esperado por estación (**favorable**).
- Se determinó a través de la media y la desviación estándar que entre las siete estaciones existe una coherencia temporal de las series (**favorable**).

Teledetección – Sensores remotos:

- La imagen satelital del sensor GIOVANNI descargada del satélite meteorológico TRMM_3B43 v7, cuenta con una resolución espacial de 0,25°, la cual para una escala local es óptima, toda vez que, al comparar los registros con las siete estaciones meteorológicas, presentan el mismo régimen bimodal (**favorable**).
- La imagen satelital descargada proporcionó únicamente información para un periodo de 21 años (1998 – 2019), la cual si bien, no cuenta con datos vacíos, solo cuenta con 252 registros mensuales para el periodo común de 20 años. (**negativo**).
- El satélite meteorológico TRMM_3B43 v7, proporcionó la información en unidades mm/mes, las cuales fueron descargadas en formato CSV (**favorable**).
- El satélite meteorológico TRMM_3B43 v7 presentó inicialmente una altitud de 350 km, el cual fue elevado a 403 km a partir del 23 de agosto de 2001, condición que no afectó el registro de los datos de precipitación, toda vez que se analizaron y no se presentaron cambios fuertes en la distribución estadística de los registros (**favorable**).
- La cobertura espacial del satélite es de 16 órbitas al día cubriendo latitudes tropicales entre 35°S – 35°N (**favorable**).

- La longitud de onda del satélite TRMM_3B43 v7, presenta frecuencias del orden 10.7, 19.4, 21.3, 37, 85.5 GHz (**favorable**).

Temperatura:

El parámetro climatológico de temperatura es considerado la otra variable de entrada más significativas, toda vez que, con esta se determina la evotranspiración potencias, y con esta, también se da inicio al balance hídrico climatológico, y permite definir el mes en que se da inicio al balance ($P > ETP$), para finalmente definir los meses de déficit y superávit de la cuenca, así como la cantidad de agua precipitada que se convirtió en evotranspiración real.

A continuación, se describe de manera cualitativa los parámetros identificados dentro de cada método de obtención de información meteorológica, que afectaron de manera favorable o negativa los datos de salida

Estaciones meteorológicas:

- Para determinar la temperatura media mensual multianual de la cuenca del río Checua, se contó con solo una estación meteorológica (**negativo**).
- La estación meteorológica de la cual se obtuvieron los registros de temperatura es administrada por la CAR, y se encuentra ubicada dentro del área de la cuenca del río Checua y es de tipo climatológica principal (**favorable**).
- La estación climatológica principal presenta una elevación de 2.580 m, lo que permite obtener mejores correlaciones, y datos más homogéneos, así mismo, de acuerdo con esta característica topográfica, se cuenta con similares condiciones climáticas y de paisaje (**favorable**).
- La estación climatológica principal en total presentó solo un (1) dato vacío en los registros mensuales para el periodo de 20 años definido entre 1998 – 2018 (**favorable**).

- Una vez efectuado el llenado de datos vacíos a través de la media de los datos anuales para cada mes, se obtuvo en total 252 registros para la variable climatológica de temperatura (**negativo**).
- La estación climatológica principal presentó una disponibilidad de información de más de 20 años, la cual se encuentra activa a la fecha de elaboración del presente proyecto de investigación (**favorable**).
- Al validar la estructura de los registros de datos de la estación climatológica principal, se comprobó que tanto la estructura de cada registro como el valor de cada dato fuera el esperado por la estación (**favorable**).

Teledetección – Sensores remotos:

- La imagen satelital del sensor GIOVANNI descargada del satélite meteorológico MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5, cuenta con una resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,625^\circ$, la cual para una escala local es óptima, toda vez que, al comparar los registros con la estación climatológica principal, presentan la misma distribución temporal, la cual coincide con el régimen bimodal de precipitación – temperaturas más altas en periodos secos y más bajas en periodos húmedos (**favorable**).
- La imagen satelital descargada proporcionó únicamente información para un periodo de 21 años (1998 – 2019), la cual, si bien no cuenta con datos vacíos, solo cuenta con 252 registros mensuales para el periodo común de 20 años. (**negativo**).
- El satélite meteorológico MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5, proporcionó la información en unidades $^\circ\text{C}/\text{mes}$, las cuales fueron descargadas en formato CSV (**favorable**).
- La cobertura espacial del satélite es de 16 órbitas al día cubriendo latitudes tropicales entre $35^\circ\text{S} - 35^\circ\text{N}$ (**favorable**).
- La longitud de onda del satélite MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5, presenta

frecuencias del orden 10.7, 19.4, 21.3, 37, 85.5 GHz (**favorable**).

- **Variables de salida:**

Las variables de salida para los balances hídricos climáticos por método tradicional (estaciones) y método de teledetección (sensores remotos – satélites) son la evapotranspiración potencial - ETP, percolación, déficit y evapotranspiración real – ETR, las cuales se vieron afectadas por los parámetros cualitativos determinados para cada variable de entrada (precipitación y temperatura), de la siguiente manera:

De acuerdo a la identificación de los parámetros establecidos como favorables y negativos para cada método de obtención de información, se estableció que la variable de precipitación registrada por la imagen satelital TRMM_3B43 v7, es la que más afecta los datos de salida, de acuerdo al parámetro considerado del número de registros mensuales en el periodo de 20 años, toda vez que, al contar con tan pocos registros, comparados con los de las siete estaciones meteorológicas ($252 < 1.764$), el satélite generó un diferencia de 625,34 mm en la precipitación media de la cuenca, cantidad que afectó el mes de inicio del BHC y la cantidad de agua almacenada en el suelo, lo que ocasionó una cantidad significativa de percolación y un déficit de agua de 0 en la cuenca del río Checua.

Ahora bien, en relación con la otra variable de entrada del BHC, la cual es la temperatura, se determina que tanto los registros obtenidos por la estación climatológica principal y el satélite meteorológico MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5, presentan los mismos parámetros negativos identificados por los autores de la investigación, ya que ambos métodos solo cuentan con 252 registros de temperatura, razón por la cual la diferencia en los resultados de salida de la ETP es de apenas 20,53 mm (0,97%) y de la ETR de 48,00 mm (0,93%), con los cual se puede determinar (ver grafica 20) que si bien los datos de teledetección presentan temperaturas más altas que las de las estaciones, el cambio no se considera fuerte (0,8°C).

Finalmente, se determina que la variable de entrada de precipitación de los datos de teledetección, es el parámetro que más afecta los datos de salida del BHC, con lo cual se establece que el modelo no es confiable y poco robusto.

8. CONCLUSIONES

- Se determina que los registros climatológicos del parámetro de precipitación, obtenidos de las siete estaciones meteorológicas y del satélite Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM, describen de manera satisfactoria el comportamiento de las lluvias de la cuenca del río Checua, toda vez que, ambos métodos de obtención de información, representan el mismo régimen Pluviométrico Bimodal, caracterizado por presentar dos períodos típicos de lluvias en el año, uno más lluvioso en el primer semestre (marzo a mayo y de octubre a noviembre) y otro menos lluvioso (diciembre a febrero y de junio a septiembre), tal como se demuestra en la gráfica 19. No obstante, al analizar los resultados de manera cuantitativa, se evidencia una diferencia del 43% en la cantidad de lluvia precipitada registrada por la ponderación de las siete estaciones meteorológicas de la CAR, y el único registro del satélite meteorológico del servidor GIOVANNI, toda vez que, mes a mes se evidencia una diferencia de casi el doble en relación una con la otra, presentando acumulados mensuales multianuales (20 años) de 677,39 mm para la información obtenida por método tradicional y de 1.302,73 mm por el método de teledetección, discrepancia que se vieron manifestadas en los resultados de los balances hídricos climatológicos desarrollados para esta investigación.

Aunado con lo anterior, se establece que a pesar de que los registros de precipitación media mensual multianual, proporcionadas por estaciones meteorológicas y por el sensor remoto TRMM, presentan el mismo comportamiento mensual durante todo el año, las intensidades de lluvia en milímetros (mm) registran una diferencia que afectan de manera considerable los resultados de los balances hídricos por cada método de obtención de información, toda vez que la parámetro climatológico de precipitación es un dato de entrada que condiciona de manera directa el dato de salida.

- En relación con los resultados del parámetro climatológica de la temperatura. presentados en la gráfica 20, en la cual, se relacionó el comportamiento de este variable meteorológica con registros de la única estación climatológica principal ubicada dentro de la zona de estudio, y datos obtenidos del satélite

MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5, se concluye que, ambos métodos de obtención de información, registraron un comportamiento similar de este parámetro, toda vez que, en los meses de febrero a mayo y de octubre a noviembre se presentan los valores más altos, y los valores medios más bajos se presentan en los meses de enero, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre, disposición que coincidiendo con el período más lluvioso, y el más seco respectivamente (ver gráfico 19). Sin embargo, la diferencia entre los registros de temperatura obtenidos por los métodos de estaciones meteorológicas y teledetección, se evidenciaron en el cálculo de la evapotranspiración mensual multianual, toda vez que mes a mes se presentan diferencias en el orden de los 0.09 °C y 1,25 °C en relación una con la otra, generando temperaturas medias multianuales de 14 °C para la información obtenida por método tradicional y de 14,83 °C por el método de señores remotos (diferencia de 0,8°C).

Conforme con lo anterior, se determina que los registros de temperatura media mensual multianual, proporcionadas por la estación climatológica principal CHECUA y por el satélite MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5, presentan el mismo comportamiento mensual durante todo el año, pero los grados centígrados registran una diferencia que afectan de manera considerable el cálculo de la EPT (20,53 mm de diferencia), y con esta, los resultados de los balances hídricos por cada método de obtención de información, toda vez que la parámetro climatológico de temperatura es un dato de entrada que condiciona de manera directa el dato de salida (EPT y EPR).

- Una vez se analizó el comportamiento de las variables de entrada (precipitación y temperatura) de cada método de obtención de información climatológica, se evidenció un comportamiento totalmente diferente en las variables de salida, ya que una de ellas, la percolación para el BHC con información de estaciones es apenas de 21,68 mm, lo que permitió determinar que la cuenca no dispone de una cantidad considerable de aguas lluvias almacenadas en exceso en el suelo, información que coincide con la bibliografía de la zona de estudio investigada, caso contrario con la percolación resultante del BHC con registros históricos obtenidos del sensor

remoto (TRMM), la cual establece 561,91 mm de exceso en la capacidad de almacenamiento del suelo de la cuenca del Río Checua, lo cual generaría que en esta, no se presente ningún mes con déficit y que la cuenca permanezca saturada todo el tiempo, contradiciendo la información climatológica e hidrológica de la zona de estudio.

- Aunado con lo anterior, con el BHC por medio de estaciones meteorológicas, se calculó que la cuenca presenta un déficit de 27,28 mm, lo que permitió determinar que el porcentaje de recarga es bajo (3%), y que no dispone de agua almacenada en el suelo, situación que genera caudales mínimos de escorrentía, ahora, los caudales según el BHC por teledetección, al no contar con meses con déficit en el suelo, y presentar suelos saturados, se pudo concluir que la cuenca presentará caudales muy grandes y un porcentaje de recarga del acuífero (43%) superior, comparado con el del BHC determinado por el método tradicional.

Finalmente, en relación con la ETR, el BHC por método tradicional arrojó un valor de 655,70 mm y de 682,98 mm de ETP ($ETP > ETR$), con lo cual se determina que el 96,78% de las lluvias (677,39 mm) son consumidas en procesos de evaporación y transpiración de las plantas, razón por la cual, la cuenca no cuenta con suelos saturados en su capacidad de almacenamiento ni con escorrentía superficial considerables, en cambio el BHC por el método de teledetección, presenta una ETR de 703,70 mm y una ETP de 703,51 mm, siendo estas muy similares, ya que la cuenca no presenta déficit, toda vez que, de la precipitación total mensual multianual (1.302,73 mm), solo el 54,08% es consumido por la plantas por medio de los proceso de evaporación y transpiración, con lo cual, la zona de estudio presentaría suelos totalmente saturadas y escorrentía superficial considerable.

- Se determina que el Balance Hídrico Climatológico realizado por medio de registros climatológicos obtenidos por teledetección, no representan las condiciones climáticas y características hidrológicas de la cuenca del Río Checua, toda vez que, los resultados reflejan una cuenca totalmente saturada durante todo el año (capacidades máximas de almacenamiento en 10 de los 12 meses), y sin meses en los cuales se registre déficit en el suelo. Sin embargo, de conformidad con las características climáticas e hidrológicas de cuenca estudiada y los resultados del Balance Hídrico Climatológico por estaciones meteorológicas, esta presenta déficit en los meses de enero y febrero, y únicamente suelos saturados (exceso) en tres meses (mayo, junio y noviembre).
- Con los resultados obtenidos de los Balances Hídricos Climatológicos para un periodo de 20 años, desarrollados a partir de registros climatológicos de estaciones y satelitales meteorológicos, se establece que los variables de entra (precipitación y temperatura), afectan de manera considerable los periodos secos y húmedos, las cantidades de precipitación de cada mes, la evotranspiración potencial (ETP), evotranspiración real (ETR) y los meses donde se registra percolación y déficit, presentando cambios únicamente en la intensidad medida en milímetros de las variables de entrada y salida.

Conforme con lo anterior, y de acuerdo con resultado cualitativos del análisis de sensibilidad sencillo, se determina que el parámetro de número de registros mensuales en el periodo de 20 años de la variable de precipitación, fue la medida que afecto los datos de salida del balance hídrico climatológico del método de teledetección, toda vez que, al contar con tan solo 252 registros, comparados con los 1.764 de las siete estaciones, se generó un diferencia de 625,34 mm en la precipitación media de la cuenca, cantidad que afectó el mes de inicio del BHC y la cantidad de agua almacenada en el suelo, lo que ocasionó una cantidad significativa de percolación y un déficit de agua de 0 en la cuenca del río Checua.

- Los resultados obtenidos por medio del método de teledetección, pueden ser confiables siempre y cuando, se obtenga información climatológica de la

zona (precipitación y temperatura) de diferentes satélites meteorológicos, con los cuales, se puedan realizar correlaciones de un número considerable de registros, esto con el fin de tener datos más homogéneos del área de estudio, y que permitan replicar esta metodología en zonas del país, donde no se cuente con estaciones meteorológicas en cantidades considerables para un estudio hidrológico.

- Con los resultados de la presente investigación, se demuestra que la información disponible en los diferentes servidores de sensores remotos, permite emplear el método directo o Balance Hídrico Climático en cuencas hidrográficas del departamento de Cundinamarca, razón por la cual, se deberá replicar en otras cuencas no solo del departamento sino del país donde la información sea de difícil acceso o precaria, aumentando el número de imágenes satelitales, y con esto la cantidad de registros anuales de variables climatológicas. Las futuras investigaciones con teledetección, pueden encaminarse al estudio de las variaciones espaciotemporales del balance hídrico y en las correcciones para el ajuste de los resultados comparados con el de estaciones meteorológicas, aprovechando la capacidad de los sensores remotos para capturar los cambios que ocurren en la superficie terrestre. Así mismo, es importante resaltar que la información que proporcionan los diferentes satélites meteorológicos, oceanográficos y medioambientales, han ocasionado y permitido la construcción de nuevos campos de investigación en hidrología y, adicionalmente, son una herramienta digital a distancia, que ha facilitado la obtención de datos espaciales de difícil acceso en campo, y de adquirir por otros métodos.

Finalmente, se concluye que con la entrada en funcionamiento de la captación de imágenes satelitales (teledetección) hace más de cuarenta años de casi todo el planeta tierra, ya se cuenta con valiosos registros de información para el desarrollo de estudios multitemporales, con lo cuales se pueden estudiar el cambio de numerosas cuencas hidrográficas o zonas acuáticas de gran interés.

9. RECOMENDACIONES

- El uso de los datos meteorológicos obtenidos por teledetección, cuenta con información ajustada para realizar análisis hidrológicos, esto teniendo en consideración, que se encontró un comportamiento similar con los registros obtenidos por medio de las estaciones meteorológicas en relación al comportamiento temporal de la precipitación y temperatura, sin embargo, sus intensidades en mm y °C fueron mayores a las captadas por las estaciones, por lo que se recomienda, obtener registros de diferentes satélites y realizar una correlación de los datos, con el fin de obtener un registro acorde a la zona de estudio.
- Con el presente proyecto de investigación, se puede afirmar que, al contar con un número mayor de imágenes de diferentes satélites con un periodo más amplio que el de 20 años (1998 – 2018), permitiría calcular con mayor exactitud la precipitación total y temperatura media mensual multianual de la Cuenca de Río Checua y de cualquier otra, lo cual repercutirá en mejores resultados en el desarrollo de los balances hídricos climatológicos – BCH.
- Finalmente, el desarrollo de los balances hídricos climatológicos - BCH, permitió establecer que las imágenes suministradas por los satélites TRMM_3B43 v7 (precipitación) y MERRA-2 Model M2TMNXFLX v5 (temperatura) demostraron una resolución espacial idónea, para el trabajo a una escala local. No obstante, debido a su resolución temporal baja, genera que no sea posible proporcionar registros más cercanos a los de las estaciones. En consecuencia, se hace necesario combinar y/o complementar la información obtenida de los dos satélites meteorológicos con otros sensores remotos, que cuenten con una mayor resolución temporal, y con esto lograr una estimación más operativa de la precipitación, temperatura y evapotranspiración.

10. BIBLIOGRAFÍA

- ANGULO, Gineth, VELÁSQUEZ Wilmar. Balance hídrico para la finca flores CANELÓN DE GR CHÍA S.A.S., del consumo de agua subterránea en época de estiaje y aguas lluvias en época de invierno, integrado a tuberías presurizadas, canales abiertos y reservorios de almacenamiento. Bogotá. 2017. 83.p. Trabajo de investigación (trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos). Facultad de ingeniería.
- ALLEY, William, M., On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and acuífer recharge in monthly water balance models. Water Resources Research. Volume 20. 1984, p. 1137.
- BAKER, C., LAWRENCE, R., MONTAGNE, C., PATTEN, D. Mapping wetlands and riparian areas using Landsat ETM+ imagery and decision-tree-based models. En: The Society of Wetland Scientists. Vol.; 26 No 2 (Jun 2006); p. 465-474.
- BERTRAND, Loos. LEMAÎTRE, Paul. "A review on global sensitivity analysis methods". {En línea}. {12 de abril de 2020} disponible en: (<https://arxiv.org/pdf/1404.2405.pdf>).
- CLARO R. Francisco A. Balance Hídrico, Fundación Universidad Central, Facultad de Ingeniería en Recursos Hídricos, Bogotá 1.991.
- CHOW Ven Te, MAIDMENT David R, MAYS Larry W. Hidrología aplicada. 1 ed. Bogotá. Mc GRAW HILL. 1994.
- CHUVIECO, Emilio, SALAS, Javier, MEZA, Enrique, VARGAS, Franklin. "Empleo de la teledetección en el análisis de la deforestación tropical: el caso de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela)". {En línea} {15 de abril de 2020} disponible en: (www.researchgate.net/publication/28098824_Empleo_de_la_teledeteccion_en_el_analisis_de_la_deforestacion_tropical_el_caso_de_la_reserva_fore

stal_de_Ticoporo_Venezuela).

- CORPORACIÓN AUTONOMA DE CUNDINAMARCA. Aptitud de uso de los suelos en el área CAR. Capítulo de suelos. Bogotá, CAR. 1998.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Cuenca hidrográfica del río Checua Exploración por el tiempo y el espacio. Bogotá, 2016.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Estudio de Desarrollo y Manejo Integral de la Cuenca del Río Checua, tomo IA. Bogotá, 1980.
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Plan de Mejoramiento variables meteorológicas - IDEAM. Bogotá. DANE, 2013.
- DÍAZ CARVAJAL, Ángel, MERCADO FERNÁNDEZ, Teobaldis, Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. En: Ingeniería y Desarrollo. Vol. 35. No 2 (Jul-Dic. 2017); p. 453-467.
- DÍAZ, Lizeth, ALARCON Jairo. Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada NISCOTA para un acueducto interveredal en NUNCHÍA, CASANARE. Bogotá. 2017. 129.p. Trabajo de investigación (trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos). Facultad de ingeniería.
- DINGMAN, S. L. Physical hydrology. 2nd Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 646 p.
- ECHEVERRÍA, Cristian., HUBER, Anton, TABERLET, Florent. “Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile”. {En línea}. {12 de abril de 2020} disponible en: www.scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-

92002007000300013).

- ESTRELA, T. Metodología y recomendaciones para la evaluación de recursos hídricos. Informe técnico. Madrid: MOPFMA, 1992, 52 pp.
- FABREGAT VENTURA, Vicente. Fundamentos teóricos del control de las extracciones mediante teledetección. En: Medida y Evaluación de las extracciones de agua subterránea, (1999). pp. 89-104.
- FERNÁNDEZ, Felipe. “Introducción a la Fotointerpretación”. {En línea} {13 de abril de 2020} disponible en: (<https://www.redalyc.org/pdf/407/40703720.pdf>)
- FRAGALÁ, Federico Antonio. y OBREGÓN, Nelson. Modelos de simulación en el río Checua. Revista de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL). 2002, P. 197.
- GASPARI, Fernanda Julia, SENISTERA, Gabriela Elba. Valoración de servicios ambientales para el ordenamiento agrohidrológico en cuencas hidrográficas. Primera edición. Buenos Aires. Editorial de la Universidad de La Plata. 2016. 137p.
- GAVILÁN, Sebastian. Modelado del Balance Hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico. Argentina, 2019. 2-11p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería) Pontifica Universidad Nacional de la Plata. Facultad de ciencias agrarias y forestales.
- GIRALDO, Catalina, ALCÁZAR, Carolina. “Modelo de distribución potencial de condalia thomasiana (Rhamnaceae), especie endémica del valle del río Checua, Sabana de Bogotá, Colombia” {En línea}. {9 abril de 2020}. Disponible en: (www.researchgate.net/publication/277404965_Modelo_de_distribucion_potencial_de_Condalia_thomasiana_Rhamnaceae_especie_endemica_del_Valle_del_Rio_Checua_Sabana_de_Bogota_Colombia_Revista_Perez-Arbelaesia_No_19_47-68).

- GUTIERREZ, Eduardo. Vázquez, Gustavo. SÁNCHEZ, José. DÍAZ, Torres. Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México. {En línea}. {10 de abril de 2020} disponible en: (file:///C:/Users/Cristian/Downloads/Santillanetal_2013_BalanceHidrologicoVarClimCuencaCazonesVerMex.pdf).
- HEWLETT, John D., NUTTER, Wade L., An outline of forest hydrology. En: University of Georgia Press. (1969). P. 137.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Informe técnico final de clima insumos y bases de datos SIG: Levantamiento de inventarios de estaciones meteorológicas en el país, control de calidad de las bases de datos de información climática, análisis de la climatología nacional y generación de productos cartográficos. Bogotá. IDEAM, 2014.
- JUELA, Oscar. Estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca alta del río Catamayo hasta la estación el arenal en el sitio el boquerón, provincia de Loja. Loja. 2011, 28-31p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería agrícola) Pontificia Universidad Nacional de Loja. Área agropecuaria y de recursos naturales renovables.
- KAR G.; VERMA H. Climatic water balance, probable rainfall, rice crop water requirements and cold periods in AER 12.0 in India. Agricultural Water Management, v. 72, p. 15- 32. 2005. {En línea}. {12 de abril de 2020} disponible en: (<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.001>).
- LABRADO GARCIA, Mauricio, ÉVORA BRONDO Juan, ARBELO PÉREZ Manuel. Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Canarias. SATELMAC. 2012. 10-21p.
- LINSLEY, R., KOHLER, M. y PAULHIJSt d. Hidrología para ingenieros. Segunda edición. México: Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, 1988, 386 pp.

- MACEDO FILHO, Gregorio. “Imágenes de satélite y teledetección como herramienta de apoyo para el desarrollo de minas de yeso y escombreras en el araripe”. {En línea} {13 de abril de 2020} disponible en: (www.researchgate.net/publication/310050050_IMAGENES_DE_SATELITE_Y_TELEDETECCION_COMO_HERRAMIENTA_DE_APOYO_PARA_EL_DESARROLLO_DE_MINAS_DE_YESO_Y_ESCOMBRERAS_EN_EL_ARARIPE).
- MELGAREJO, José, ROMERO, Luis, OJEDA, Aplicaciones satelitales para la meteorología. En: APOLINAV XXI. Vol.; 5. No 198 (Ene-Dic.2019); p. 2-14.
- MONSALVE SÁENZ, German. Hidrología en la ingeniería, Bogotá. Editorial escuela colombiana de ingeniería, 2002. 129p.
- ORTIZ ARANGO & CIA, CONSULTORÍA TÉCNICA AGROPECUARIA. Estudio de Desarrollo y Manejo Integral de la Cuenca del Río Checua, TOMO IA. Bogotá, 1.980.
- PÉREZ ORTEGA, María, Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de la mancha húmeda. Madrid, 2011. 25-98p. Trabajo de investigación (magíster en tecnologías de la información geográfica). Universidad Complutense De Madrid. Facultad de geografía e historia.
- PLANEACIÓN ECOLÓGICA LTDA. Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá. Bogotá, 2019.
- RODRIGUEZ CHAVEZ, Oscar, ARREDONDO BAUTISTA, Harold, Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería Civil. Bogotá, 2005. 24-50p. Trabajo de investigación (pregrado en ingeniería civil) Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería.
- RUIZ, A. O.; ARTEAGA, R. R.; VAZQUEZ, P. M. A.; LOPEZ, L. R.;

ONTIVEROS, C. R. E. Requerimiento de riego y predicción del rendimiento en gramíneas forrajeras mediante un modelo de simulación en Tabasco, México. *Agrociencia*, v. 45, p. 745-760, 2011.

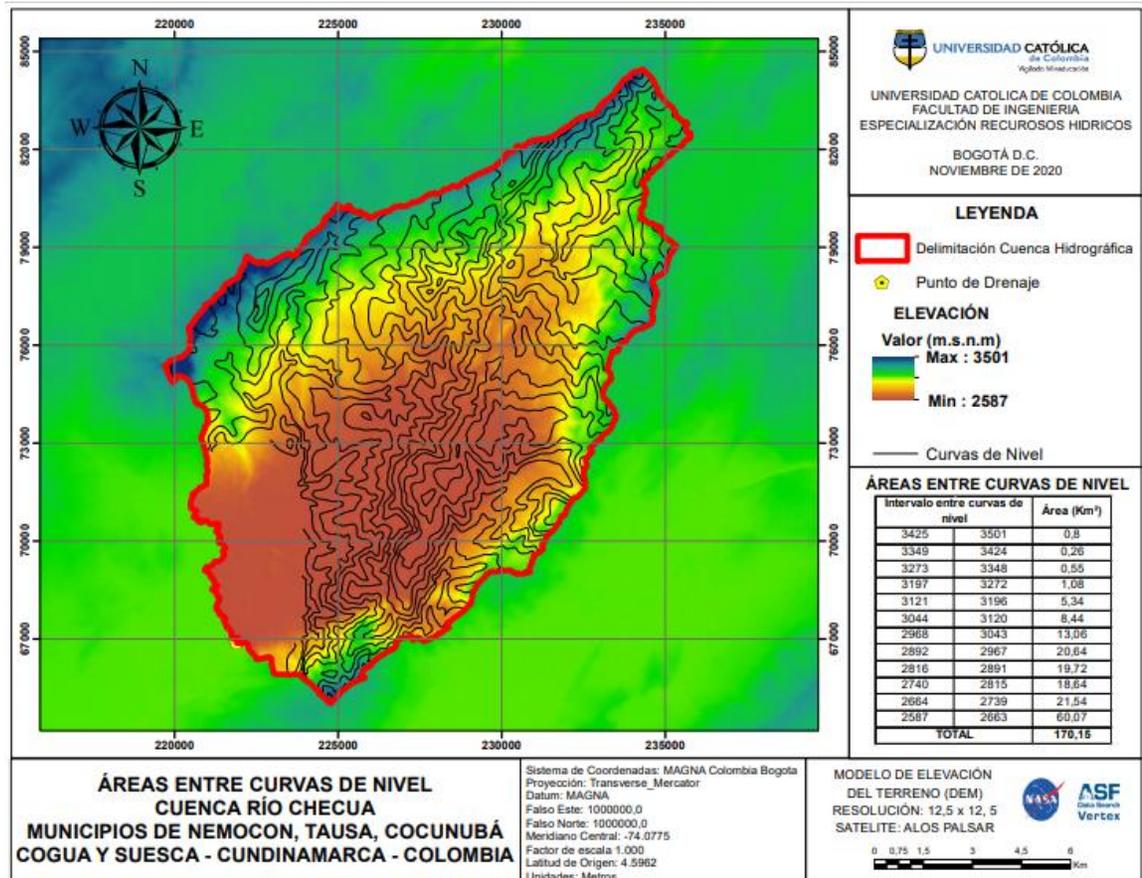
- SALTELLI, Andrea, TARANTOLA, Stefano, CAMPOLONGO, Francesca, RATTO, Marco. *Sensitivity analysis in practice*. United Kingdom. John Wiley & Sons Ltd., 2004. 63p.
- TRENCH, Mariana. “El derecho espacial y la cooperación internacional ante los desastres naturales”. {En línea} {13 de abril de 2020} disponible en: (www.researchgate.net/publication/340819025_EL_DERECHO_ESPACIAL_Y_LA_COOPERACION_INTERNACIONAL_ANTE_LOS_DESASTRES_NATURALES).
- TOMÁS, Albert, NIETO Héctor, GUZINSKI Radoslaw, SANDHOLT Inge, BERLINER Pedro, “Aplicaciones de la teledetección en hidrología: estimación de la evapotranspiración mediante el método del triángulo” {En línea} {12 abril de 2020}. Disponible en: http://www.cpaisaje.org/geomatica_agua/Cuadernos%20de%20Geomatica_1-16x24cm.pdf. P.111-127.
- UNESCO ROSTLAC. *Guía metodológica para la elaboración de/ balance hídrico de América del Sur. Informe Técnico*. Mon. teideo: UNESCO, 1982, 130 pp.
- UNIVERSIDAD DE SEVILLA. *Balance Hídrico Prácticas*. {En línea}. {12 de abril de 2020} disponible en: (http://titulaciongeografia-sevilla.es/contenidos/profesores/materiales/archivos/2018-10-29BH_Practicas.pdf).
- VAN DE GRIEND, Adriaan A., ENGMAN, Edwin T. (1985). Partial area hydrology and remote sensing. En: *Journal of Hydrology*. Vol.; 81 No 3-4 (Nov. 1985); p. 211–251.

Anexo A – RELACIONANDO LA GEODATABASE DESARROLLADA Y GENERADA EN EL PROGRAMA ARCGIS

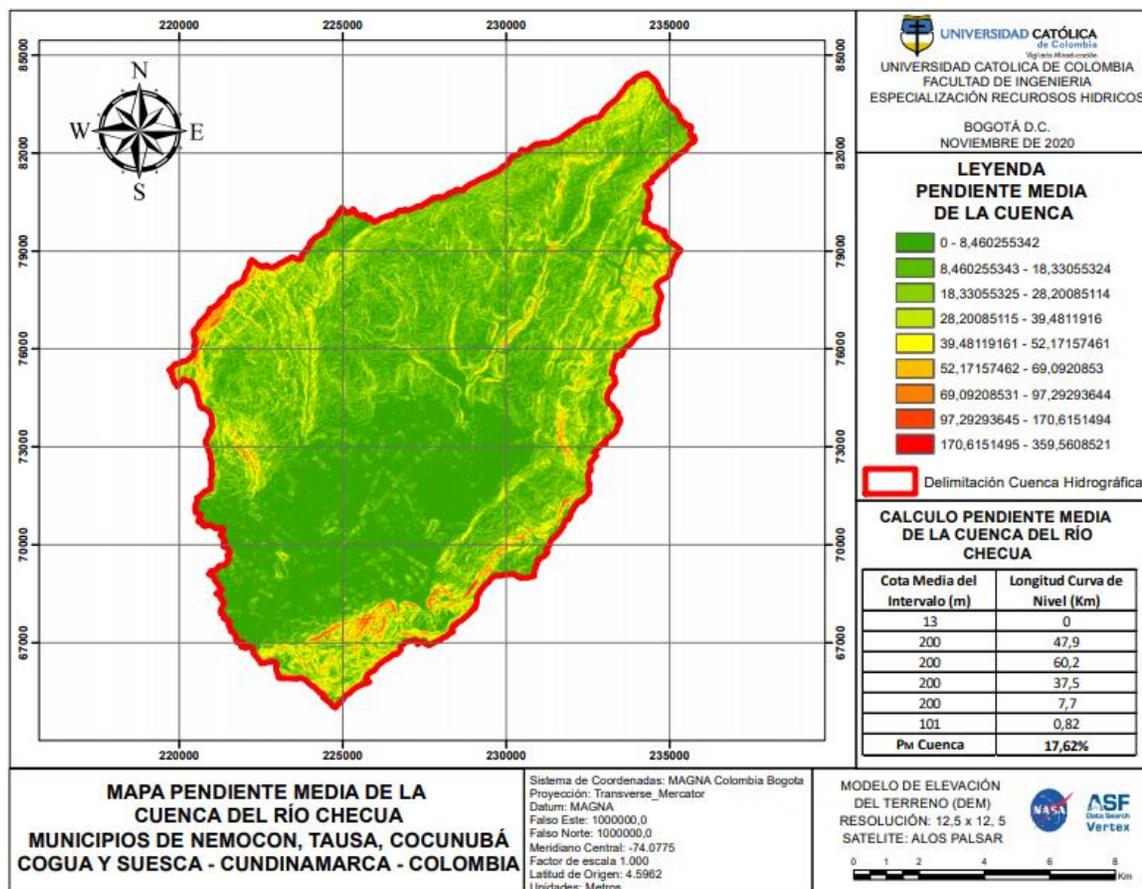
| Nombre | Fecha de modificación | Tipo | Tamaño | | Fecha de modificación | Tipo | Tamaño |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------|--|-----------------------|--------------------|--------|
| ch_reclasi | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | CHP_Reclasi.aux | 10/19/2020 4:43 PM | Documento XML | 2 KB |
| chp_reclasi | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Clip_cor_prim.cpg | 10/16/2020 10:27 AM | Archivo CPG | 1 KB |
| corr_prim | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Clip_cor_prim.dbf | 10/16/2020 10:27 AM | Archivo DBF | 8 KB |
| cun_r_checua | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Clip_cor_prim.prj | 10/16/2020 10:27 AM | Archivo PRJ | 1 KB |
| dem_cuen | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Clip_cor_prim.sbn | 10/16/2020 10:27 AM | Archivo SBN | 2 KB |
| fill_dem | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Clip_cor_prim.sbx | 10/16/2020 10:27 AM | Archivo SBX | 1 KB |
| fill_dem_cuen | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Clip_cor_prim.shp | 10/16/2020 10:27 AM | AutoCAD Shape S... | 33 KB |
| flow_acum | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Clip_cor_prim.shp | 10/16/2020 10:27 AM | Documento XML | 7 KB |
| flow_direct | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Clip_cor_prim | 10/16/2020 10:27 AM | AutoCAD Compil... | 2 KB |
| info | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Con_flowaccu4.DESKTOP-516FFTC.28000... | 10/16/2020 8:15 AM | Archivo LOCK | 0 KB |
| primaria | 10/21/2020 4:14 PM | Carpeta de archivos | | Corr_primarp.cpg | 10/16/2020 10:08 AM | Archivo CPG | 1 KB |
| 3d_alturas.cpg | 10/16/2020 11:00 AM | Archivo CPG | 1 KB | Corr_primarp.dbf | 10/16/2020 10:08 AM | Archivo DBF | 8 KB |
| 3d_alturas.dbf | 10/16/2020 11:00 AM | Archivo DBF | 1 KB | Corr_primarp.prj | 10/16/2020 10:08 AM | Archivo PRJ | 1 KB |
| 3d_alturas.prj | 10/16/2020 11:00 AM | Archivo PRJ | 1 KB | Corr_primarp.sbn | 10/16/2020 10:08 AM | Archivo SBN | 2 KB |
| 3d_alturas.sbn | 10/16/2020 11:00 AM | Archivo SBN | 1 KB | Corr_primarp.sbx | 10/16/2020 10:08 AM | Archivo SBX | 1 KB |
| 3d_alturas.sbx | 10/16/2020 11:00 AM | Archivo SBX | 1 KB | Corr_primarp | 10/16/2020 10:08 AM | AutoCAD Shape S... | 33 KB |
| 3d_alturas | 10/16/2020 11:00 AM | AutoCAD Shape S... | 180 KB | Corr_primarp.shp | 10/16/2020 10:08 AM | Documento XML | 1 KB |
| 3d_alturas.shp | 10/16/2020 11:00 AM | Documento XML | 1 KB | Corr_primarp | 10/16/2020 10:08 AM | AutoCAD Compil... | 2 KB |
| 3d_alturas | 10/16/2020 11:00 AM | AutoCAD Compil... | 1 KB | Cuenca_polyg.cpg | 10/16/2020 3:41 PM | Archivo CPG | 1 KB |
| Area_entre_curvas.cpg | 10/19/2020 6:26 PM | Archivo CPG | 1 KB | Cuenca_polyg.dbf | 10/16/2020 3:41 PM | Archivo DBF | 1 KB |
| Area_entre_curvas.dbf | 10/19/2020 6:26 PM | Archivo DBF | 1 KB | Cuenca_polyg.prj | 10/15/2020 7:26 PM | Archivo PRJ | 1 KB |
| ASF_VERTEX | 10/21/2020 8:40 AM | Archivo PNG | 11 KB | Cuenca_polyg.sbn | 10/16/2020 3:41 PM | Archivo SBN | 1 KB |
| CH_Reclasi.aux | 10/19/2020 4:48 PM | Documento XML | 2 KB | Cuenca_polyg.sbx | 10/16/2020 3:41 PM | Archivo SBX | 1 KB |
| Cuenca_polyg | 10/16/2020 3:41 PM | AutoCAD Shape S... | 14 KB | Profile Graph Title.grf | 10/20/2020 9:30 PM | Archivo GRF | 13 KB |
| Cuenca_polyg.shp | 10/15/2020 7:26 PM | Documento XML | 1 KB | Punto_Cierre_Cuenca.cpg | 10/15/2020 4:33 PM | Archivo CPG | 1 KB |
| Cuenca_polyg | 10/16/2020 3:41 PM | AutoCAD Compil... | 1 KB | Punto_Cierre_Cuenca.dbf | 10/15/2020 4:33 PM | Archivo DBF | 1 KB |
| Cuenca_Rio_Checu | 10/20/2020 11:30 PM | ArcGIS ArcMap D... | 6.577 KB | Punto_Cierre_Cuenca.prj | 10/15/2020 4:30 PM | Archivo PRJ | 1 KB |
| Cuenca_Rio_Checu_Mapas | 10/21/2020 8:42 AM | ArcGIS ArcMap D... | 6.719 KB | Punto_Cierre_Cuenca.sbn | 10/15/2020 4:33 PM | Archivo SBN | 1 KB |
| Cuenca_Rio_Checu_Mapas_2 | 10/21/2020 8:42 AM | ArcGIS ArcMap D... | 3.326 KB | Punto_Cierre_Cuenca.sbx | 10/15/2020 4:33 PM | Archivo SBX | 1 KB |
| Cun_R_Checu.aux | 10/15/2020 4:39 PM | Documento XML | 1 KB | Punto_Cierre_Cuenca | 10/15/2020 4:33 PM | AutoCAD Shape S... | 1 KB |
| Dem_Cuen.aux | 10/16/2020 11:22 AM | Documento XML | 2 KB | Punto_Cierre_Cuenca.shp | 10/15/2020 4:30 PM | Documento XML | 2 KB |
| Fill_Dem.aux | 10/16/2020 11:08 AM | Documento XML | 3 KB | Punto_Cierre_Cuenca | 10/15/2020 4:33 PM | AutoCAD Compil... | 1 KB |
| fill_dem.ovr | 10/16/2020 11:08 AM | Archivo OVR | 12.082 KB | Punto_cierre_Elva.cpg | 10/15/2020 4:36 PM | Archivo CPG | 1 KB |
| Fill_dem_cuen.aux | 10/16/2020 11:21 AM | Documento XML | 2 KB | Punto_cierre_Elva.dbf | 10/15/2020 4:36 PM | Archivo DBF | 1 KB |
| Flow_Acum.aux | 10/15/2020 4:03 PM | Documento XML | 2 KB | Punto_cierre_Elva.prj | 10/15/2020 4:36 PM | Archivo PRJ | 1 KB |
| flow_acum.ovr | 10/15/2020 4:03 PM | Archivo OVR | 13.450 KB | Punto_cierre_Elva.sbn | 10/15/2020 4:36 PM | Archivo SBN | 1 KB |
| Flow_Direct.aux | 10/15/2020 2:29 PM | Documento XML | 1 KB | Punto_cierre_Elva.sbx | 10/15/2020 4:36 PM | Archivo SBX | 1 KB |
| log | 10/15/2020 2:35 PM | Archivo | 1 KB | Punto_cierre_Elva | 10/15/2020 4:36 PM | AutoCAD Shape S... | 1 KB |
| Long_red_H.cpg | 10/21/2020 11:39 AM | Archivo CPG | 1 KB | Punto_cierre_Elva.shp | 10/15/2020 4:36 PM | Documento XML | 2 KB |
| Long_red_H.dbf | 10/21/2020 11:39 AM | Archivo DBF | 1 KB | Punto_cierre_Elva | 10/15/2020 4:36 PM | AutoCAD Compil... | 1 KB |
| Long_Red_Hid.cpg | 10/21/2020 11:51 AM | Archivo CPG | 1 KB | Rio_Checu.cpg | 10/20/2020 6:31 PM | Archivo CPG | 1 KB |
| Long_Red_Hid.dbf | 10/21/2020 11:51 AM | Archivo DBF | 4 KB | Rio_Checu.dbf | 10/20/2020 6:31 PM | Archivo DBF | 1 KB |
| Longitud_red_Drenaje | 10/21/2020 11:04 AM | Documento de te... | 3 KB | Rio_Checu.prj | 10/16/2020 10:41 AM | Archivo PRJ | 1 KB |
| Longitud_red_Drenaje.txt | 10/21/2020 11:04 AM | Documento XML | 1 KB | Rio_Checu.sbn | 10/20/2020 6:31 PM | Archivo SBN | 1 KB |
| Longitud_red_Hid | 10/21/2020 12:00 PM | Documento de te... | 3 KB | Rio_Checu.sbx | 10/20/2020 6:31 PM | Archivo SBX | 1 KB |
| Perfil_Longitudinal_Cauce_Principal | 10/20/2020 9:32 PM | Microsoft Edge P... | 115 KB | Rio_Checu | 10/20/2020 6:31 PM | AutoCAD Shape S... | 5 KB |
| primaria.aux | 10/15/2020 10:16 PM | Documento XML | 2 KB | Rio_Checu.shp | 10/16/2020 10:41 AM | Documento XML | 7 KB |
| Rio_Checu | 10/20/2020 6:31 PM | AutoCAD Compil... | 1 KB | | | | |
| schema | 10/21/2020 12:00 PM | Opciones de confi... | 1 KB | | | | |
| sum_long_RH.cpg | 10/21/2020 11:44 AM | Archivo CPG | 1 KB | | | | |
| sum_long_RH.dbf | 10/21/2020 11:44 AM | Archivo DBF | 1 KB | | | | |
| Sum_Output.cpg | 10/21/2020 11:50 AM | Archivo CPG | 1 KB | | | | |
| Sum_Output.dbf | 10/21/2020 11:50 AM | Archivo DBF | 4 KB | | | | |

Anexo B – Mapas resultantes de la caracterización morfométrica de la cuenca del Río Checua

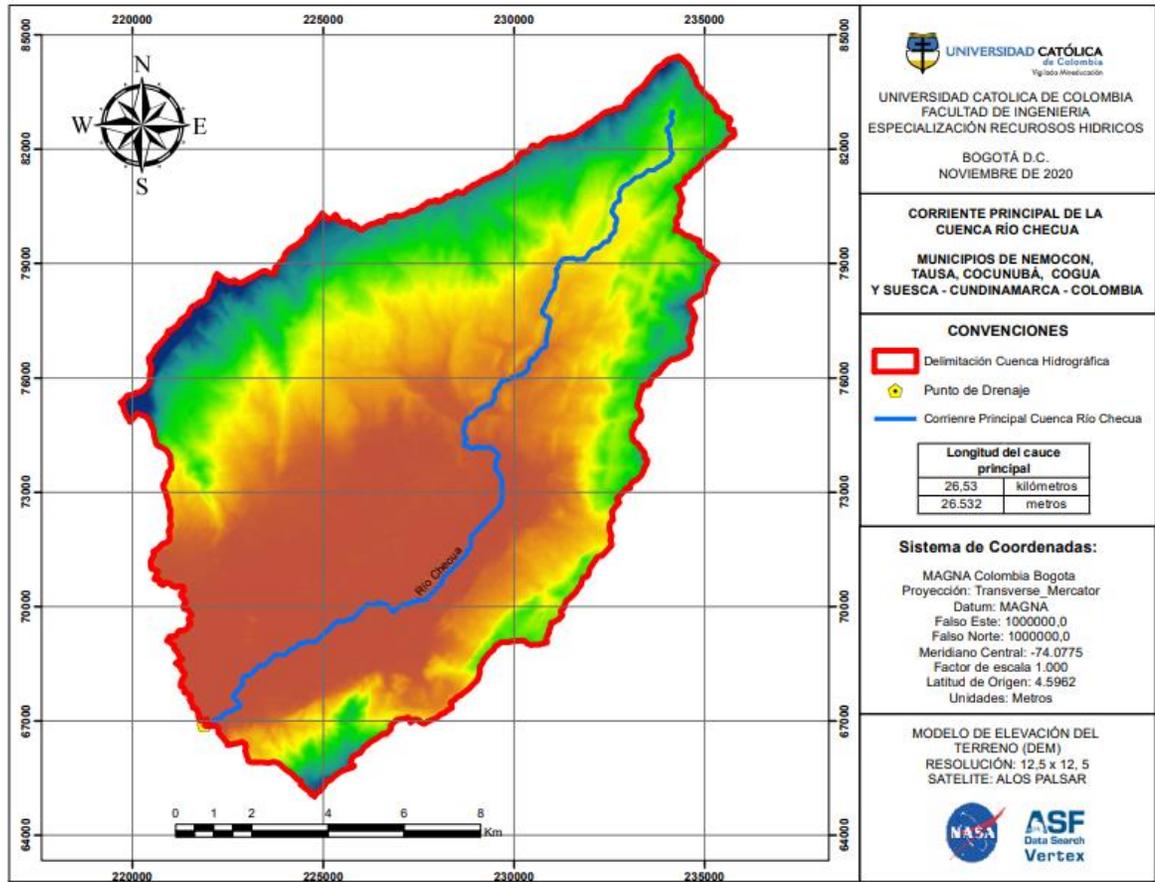
Anexo B – 1. Delimitación Cuenca Rio Checua



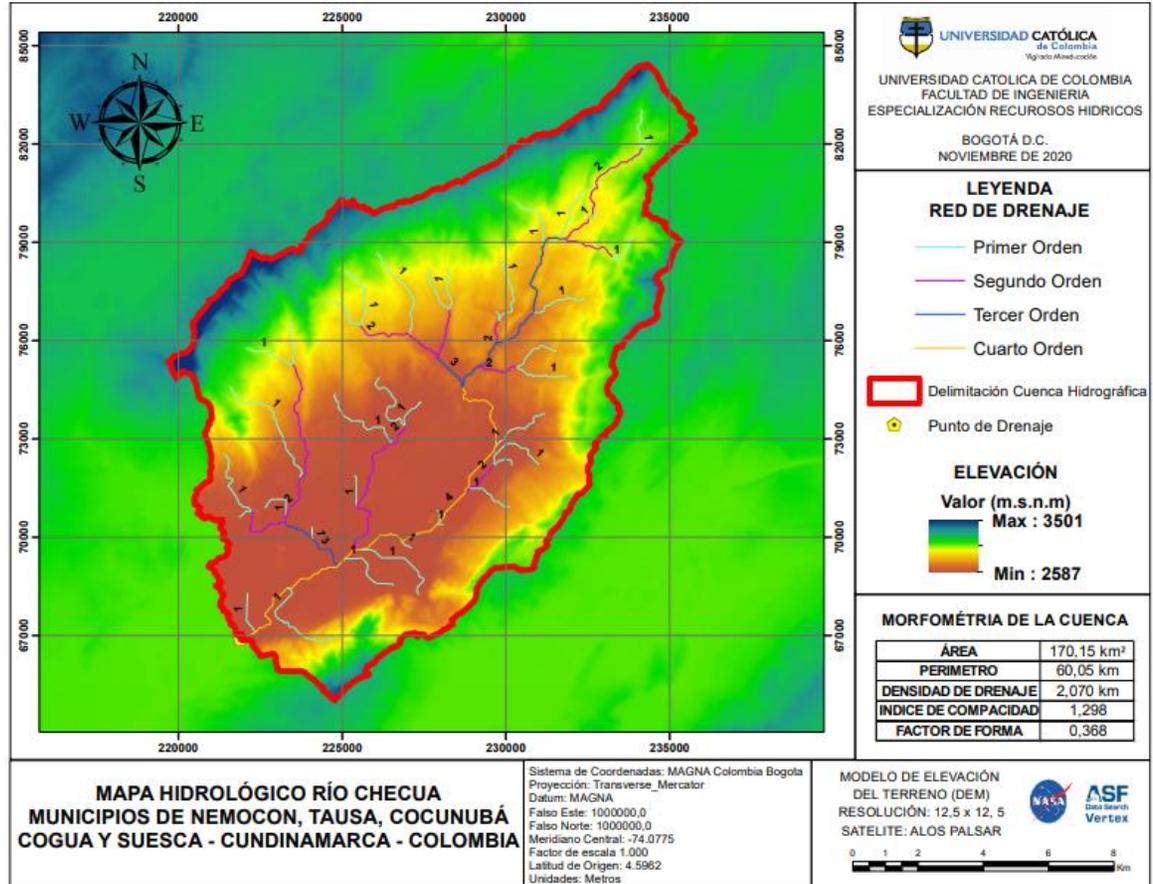
Anexo B – 2. Mapa Pendiente Media de la Cuenca



Anexo B – 3. Delimitación y Longitud Cauze Principal



Anexo B – 4. Mapa Hidrológico de la Cuenca



Anexo C – CÁLCULOS MORFOMETRÍA

| PARAMETROS MORFOMETRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO CHECUA | | |
|---|-----------------|--------|
| DESCRIPCIÓN | UNIDAD | VALOR |
| SUPERFICIE | | |
| Área | km ² | 170,15 |
| Perímetro de la cuenca | km | 60,05 |
| COTAS | | |
| Cota máxima | msnm | 3501 |
| Cota mínima | msnm | 2587 |
| ALTITUD | | |
| Altitud media | msnm | 2795 |
| Altitud más frecuente | msnm | 2702 |
| PENDIENTE | | |
| Pendiente promedio de la cuenca | % | 17,62 |
| RED HIDRICA | | |
| Longitud del curso principal | km | 26,53 |
| Orden de la Red Hídrica | UND | 4 |
| Longitud de la Red Hídrica | km | 352 |
| Densidad de la Red Hídrica | km | 2,07 |
| PARAMETROS GENERALES | | |
| Tiempo de concentración | horas | 10,82 |
| | minutos | 649,23 |
| Pendiente del cauce principal | km/km | 0,23 |

Anexo D – INFORMACIÓN DESCARGADA DE LA CAR

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA

SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120169 LADERA GRANDE

Latitud 5° 10' 21,7" N X=N=1063760 Departamento CUNDINAMARCA Corriente R. CHECUA Categoría PG
 Longitud 73° 51' 6,0" W Y=E=1025040 Municipio TAUSA Cuenca R. CHECUA Fecha Instalación 1/9/1986
 Elevación 2956 m.s.n.m Oficina Provincial 14 UBATÉ Fecha Suspensión

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1986 | | | | | | | | | 13,6 | 92,8 | 45,7 | 40,9 |
| 1987 | 7 | | 29,4 | 54,1 | 105,3 | 33,7 | 56 | 26,8 | 48,3 | 116,6 | 57 | 20 |
| 1988 | 2,9 | 15,5 | 25,9 | 96,5 | 32,5 | 61,9 | 19,4 | 66,4 | 80,6 | 129 | 58,9 | 59,4 |
| 1989 | 11,7 | 29,8 | 114,5 | 20,5 | 75,8 | 36,3 | 48,9 | 13,5 | 69,9 | 35,3 | 84,1 | 11,8 |
| 1990 | 3,8 | 56 | 39,7 | 127,8 | 103,7 | 42 | 31,4 | 46,3 | 9,4 | 142,7 | 30,6 | 20,5 |
| 1991 | 8,8 | 23,8 | 64 | 24,5 | 60,6 | 26 | 69,9 | 59,2 | 25,4 | 48,2 | 113,7 | |
| 1992 | 0 | 0 | 54,6 | 50,7 | 34,4 | 28,8 | 76,6 | 50,2 | 73,9 | 8,6 | 99,7 | 56,6 |
| 1993 | 32,1 | 41,8 | 39 | 47,6 | 163,3 | 25,8 | 42,8 | 40,6 | 76,4 | 20,4 | 87 | 10,4 |
| 1994 | 61,2 | 67,8 | 48,1 | 76,3 | 55,1 | 45,4 | 42,9 | 50,3 | 37,1 | 107 | 37,5 | 11,7 |
| 1995 | 4 | 26 | 55,3 | 54,8 | 77,3 | 36,1 | 50,7 | 72,7 | 19,3 | 58,3 | 28,8 | 126,9 |
| 1996 | 30,4 | 29,8 | 72,6 | 49,4 | 60,4 | 36,1 | 80,9 | 56,3 | 34,3 | 115,7 | 54,9 | 98,7 |
| 1997 | 102,7 | 11,6 | 16,7 | 85,4 | 36,6 | 27,5 | 39,2 | 31,6 | 25,5 | 41,8 | 35,3 | 6,2 |
| 1998 | 13,1 | 22,9 | 139,3 | 44 | 127 | 33,8 | 52,7 | 51,7 | 35,2 | 27,3 | 70,6 | 69,4 |
| 1999 | 30,1 | 86,6 | 98,9 | 72,9 | 25,5 | 39 | 17,6 | 60,7 | 86 | 155,2 | 81 | 38,8 |
| 2000 | 18 | 54,5 | 139,2 | 65,8 | 70,1 | 55,1 | 55,1 | 50,9 | 77,5 | 59,6 | 52,7 | 32,6 |
| 2001 | 0 | 19,7 | 52,2 | | | 25,6 | 36,4 | 38,2 | 62,1 | 52 | 46,8 | 29 |
| 2002 | 9,8 | 28,3 | | 146,2 | 98,8 | 65,1 | 46,7 | 41,6 | 51,3 | 50,9 | 57 | 16,9 |
| 2003 | 5,8 | 54,1 | 54,5 | 58,7 | 42 | | 32,6 | 15,8 | 77,9 | 82,3 | 56,3 | 0 |
| 2005 | 8,6 | 18 | 4,2 | 15,8 | 129,3 | | | 3,4 | 55,3 | 143,2 | 102,1 | 21,5 |
| 2006 | 37,1 | 25,8 | 170,4 | 150,8 | 114 | 129,5 | 14,3 | 51,8 | 19,7 | 109,9 | 97,9 | 6 |
| 2007 | 0 | 8,3 | 29,8 | 60 | 55,4 | 40,9 | 27 | 61,4 | 14,4 | 135,8 | 45,9 | 94,7 |
| 2008 | 31,3 | 42,8 | 69,8 | 62,4 | 98,4 | 72,1 | 62,3 | 58,1 | 65,9 | 42,8 | 194,3 | 50,6 |
| 2009 | 37,1 | 19 | | 92,4 | 53,8 | 23,4 | 41,2 | 34,2 | 31,7 | 77 | 31,8 | 0 |
| 2010 | 8 | 7,8 | 4,5 | 277,1 | 167,7 | 69,3 | 153,5 | 36,7 | 41,5 | 99,5 | 98,9 | 45,8 |
| 2011 | 17,9 | 134,7 | 170,3 | 314,1 | 151,9 | 57,2 | 70,9 | 37,2 | 47,2 | 66,7 | 190,5 | 38 |
| 2012 | 6,5 | 21,9 | 94,2 | 240,1 | 27 | 56,1 | 73,6 | 24,9 | 18,3 | 89,3 | 30,2 | 13,4 |
| 2013 | 6,5 | 39,7 | 97,6 | 96,5 | 145,8 | 31,1 | 36,9 | 57,9 | 50,7 | 14,9 | 80 | 31,5 |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120169 LADERA GRANDE

| | | | | | | | | |
|-----------|----------------|-------------|--------------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| Latitud | 5° 10' 21,7" N | X=N=1063760 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | PG |
| Longitud | 73° 51' 6,0" W | Y=E=1025040 | Municipio | TAUSA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/9/1986 |
| Elevación | 2956 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 14 UBATÉ | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2014 | 19,3 | 32,7 | 78,3 | 39,9 | 50,6 | 50,7 | 37,8 | 28 | 27,6 | 58,9 | 82,5 | 48,9 |
| 2015 | 6,6 | 26,3 | 34,3 | 24,9 | 41,1 | 111,9 | 35,2 | 24,8 | 5,8 | | 31 | 1,5 |
| 2016 | 13 | 2,5 | 59,7 | 24,8 | 14,5 | 17,7 | 1,5 | 3,5 | 67,5 | 27,5 | 71,4 | 18,7 |
| 2017 | 72,7 | 21,1 | 98,7 | 46,7 | 37,7 | 46,1 | 17,5 | 29,9 | 11,5 | 44,5 | 33,3 | 25,9 |
| 2018 | 53,8 | 89,2 | 64,1 | 140,5 | 60,3 | 52,9 | 62,4 | 24 | 32,6 | 116,2 | 55,3 | 10 |
| 2019 | 9,3 | | | | | | | | | | | |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120167 HOYO ARRIBA EL

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------------|------------------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|
| Latitud | 5° 8' 38,4" N | X=N=1060580 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | PG |
| Longitud | 73° 49' 34,8" W | Y=E=1027850 | Municipio | SUESCA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/12/1985 |
| Elevación | 2921 m.s.n.m | Oficina Provincial | 2 ALMEIDAS – GUATAVITA | | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1986 | 24,5 | 169,7 | 51 | 46 | 23,3 | 83,4 | 87,2 | 41 | 43 | 113,8 | 94,1 | 28,3 |
| 1987 | 30 | 32 | 30 | 57,6 | 94,6 | 51,2 | 99 | 71,2 | 46 | 135,5 | 54,2 | 25,6 |
| 1988 | 3,8 | 13,7 | 43,8 | 72,4 | 56,1 | 73,7 | 48,2 | 44,1 | 69,7 | 80,5 | 67,5 | 64,9 |
| 1989 | 13 | 60,2 | 139,5 | 73,9 | 82,1 | 66,9 | 62,8 | 32,6 | 71,5 | 26,5 | 9,3 | 23,1 |
| 1990 | 10,2 | 59 | 60,5 | 114,6 | 134,2 | 50,2 | 48,5 | 58,4 | 23,2 | 141,5 | 41,7 | 72,3 |
| 1991 | 29,3 | 18,7 | 109,6 | 63,4 | 43,7 | 32,9 | 105,8 | 108,9 | 23,7 | 90,7 | 98,9 | 120,5 |
| 1992 | 11,8 | 77,5 | 34,8 | 36,4 | 29,6 | 20,7 | 65,6 | 46,4 | 56,8 | 10,5 | 149,5 | 46,3 |
| 1993 | 6,9 | 33,8 | 59,9 | 0,6 | 6,5 | 55,2 | 35,7 | 0,5 | 0 | 4,8 | 140,9 | 7,7 |
| 1994 | 0,9 | 40,3 | 77,9 | 49,7 | 83,9 | 24,5 | 79,5 | 28,3 | 54,6 | 94,4 | 39 | 6,2 |
| 1995 | 3,9 | 27,1 | 79 | 91,5 | 68,9 | 46,3 | 51,1 | 66,7 | 38,9 | 85,9 | 60 | 63,2 |
| 1996 | 14,9 | 31,9 | 109,6 | 98,6 | 74,3 | 27,9 | 81,1 | 26,8 | 33,6 | 120,3 | 18 | 91,5 |
| 1997 | 73,7 | 7,7 | 30,1 | 42 | 36,9 | 76,6 | 74,3 | 47,8 | 11,1 | 84 | 25,5 | 0 |
| 1998 | 6,7 | 6,8 | 170 | 0 | 59,3 | 35 | 84,8 | 25,8 | 41,3 | 38,7 | 46,4 | 108,2 |
| 1999 | 0,1 | 64 | 41,3 | 49,9 | 37 | 43,2 | 29,4 | 50,9 | 41,2 | | 43,1 | 20,2 |
| 2000 | 2,7 | 22,4 | 117,1 | 100,7 | 62,2 | 58,7 | 70,5 | 72,5 | 116,2 | 53,6 | 82,9 | 27,2 |
| 2001 | 0,6 | 33,2 | 51,3 | | | | | | | | | 13,5 |
| 2002 | 15,8 | 2,5 | 60,9 | | | | 31 | 70,3 | | 22 | | 0 |
| 2003 | 9,7 | 1,7 | | | 16,9 | 1,3 | 7,6 | 4,3 | 3 | 16,4 | 19,5 | |
| 2006 | | | | | | 17,1 | 67,3 | 52,9 | 115,6 | | | 6,2 |
| 2007 | | | 6,1 | 52,1 | 60,3 | 62,8 | 30 | 80,1 | 27,2 | 122,8 | 49,1 | 46,3 |
| 2008 | 36,7 | 1,8 | 64,9 | 4 | | 41,4 | 63,1 | 47,9 | 14,6 | 30,1 | | |
| 2009 | | | | | 23,2 | 0,3 | | 15,1 | 17,8 | 8,5 | 38,1 | 4,5 |
| 2010 | 0 | 6,6 | 5,9 | 45,1 | 51,4 | 66,1 | 98,7 | 57 | 40,6 | 75,7 | 87,7 | 37,2 |
| 2011 | 1,7 | | | 102,9 | 116,1 | 37,4 | 4,1 | 46,5 | 48,9 | 110,5 | 144,1 | 57 |
| 2012 | 32,1 | 11,7 | 68,8 | 261,9 | 31,2 | 27 | 26 | | | | 22,7 | 18,9 |
| 2013 | 2,9 | 27,8 | 66,4 | 75,5 | 17,5 | 18,3 | 54,1 | 58,3 | 6,3 | 42,8 | | 14,2 |
| 2014 | 19,4 | 45,7 | 52,7 | | 2,4 | 70,1 | 66,2 | 38,2 | 42,2 | 48,8 | 81,4 | 37,3 |
| 2015 | | | | | | | 44,6 | 31,7 | 6,7 | 5,4 | | |
| 2017 | 13,6 | 42 | 60 | | | | | | 1,4 | 33,8 | 40,4 | |
| 2018 | 4,6 | 19,1 | 69 | 137,2 | 68,4 | 74,9 | 79,4 | 46,3 | 28,1 | 1,9 | | |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120540 CHECUA

| | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|
| Latitud | 5° 8' 0,6" N | X=N= 1057580 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente R. CHECUA | Categoría CP |
| Longitud | 73° 51' 41,1" W | Y=E= 1023960 | Municipio | NEMOCON | Cuenca R. CHECUA | Fecha Instalación 1/04/1953 |
| Elevación | 2580 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 9 SABANA CENTRO | | Fecha Suspensión |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1953 | | | | 20 | 68 | 48 | 46 | 77 | 123 | 137 | 94 | 56 |
| 1954 | | | | 120 | 67 | 122 | 56 | 78 | 1 | 215 | 100 | 16 |
| 1955 | 66 | 40 | 1 | 64 | 76 | 10 | 26 | 0 | 72 | 128 | 60 | 27,5 |
| 1956 | 21 | 87,5 | 56 | 1,4 | 14,7 | 6,1 | 2,8 | 6,3 | 6,8 | 63,5 | 69 | 39,6 |
| 1957 | 4,9 | 3 | 2,2 | 12,1 | 97 | 20,5 | 8,7 | 14,2 | 13,3 | 68 | 13 | 6 |
| 1958 | 4 | 4,4 | 9,9 | 1,3 | 28,9 | 38,6 | 34,9 | 41,2 | 5,8 | 45 | 77,8 | 20 |
| 1959 | 32 | 42,6 | 32,2 | 26,8 | 59,3 | 49,6 | 70,7 | 49,3 | 39,8 | 68,4 | 66,1 | 12,4 |
| 1960 | 15,3 | 17,8 | 163,5 | 68,2 | 59 | 25,4 | 45,3 | 32,4 | 30 | 121 | 3,2 | 90,5 |
| 1961 | 21,5 | 14 | 43,7 | 67,7 | 13,5 | 43,2 | 15,7 | 17 | 16 | 143 | 64,5 | 1 |
| 1962 | 43 | 45,5 | 54 | 31,5 | 117,1 | 88,9 | 40,6 | 48,6 | 24 | 70,4 | 95,2 | 39 |
| 1963 | 5,5 | 55 | 29 | 79 | 167,5 | 27 | 32,5 | 38 | 44,5 | 85,9 | 100,7 | 17,2 |
| 1964 | 4,5 | 35,5 | 0 | 77,5 | 94 | 56 | 39,5 | 4,5 | 15 | 93,5 | 29,5 | 5 |
| 1965 | 6 | 3 | 12,3 | 208,8 | 70 | 13,5 | 44,5 | 42 | 9,5 | 68 | 139,4 | 0 |
| 1966 | 0 | 3,5 | 65,5 | 61,5 | 83 | 45,5 | 15,5 | 27 | 26,8 | 116 | 169,5 | 71 |
| 1967 | 7,5 | 6,5 | 65,5 | 103 | 58,5 | 96,5 | 42 | 56,5 | 23 | 73 | 104 | 42,5 |
| 1968 | 0 | 54,5 | 14,5 | 149 | 75,1 | 108 | 51 | 40 | 56 | 37,9 | 75 | 7 |
| 1969 | 46,5 | 14 | 1,5 | 163 | 63 | 38 | 28,5 | 28,5 | 29 | 131,5 | 45 | 5 |
| 1970 | 16,8 | 52,5 | 36,1 | 22,5 | 114,5 | 35,7 | 37,3 | 21,9 | 70,6 | 138,4 | 87,2 | 8,2 |
| 1971 | 47,5 | 27,7 | 74,1 | 98,8 | 79 | 35 | 33,6 | 44,5 | 40 | 46,5 | 60,2 | 28,8 |
| 1972 | 79,8 | 27,7 | 99,3 | 171 | 68,5 | 72,8 | 34,8 | 29,8 | 8,9 | 44,2 | 50,8 | 11,2 |
| 1973 | 0,8 | 43,4 | 20,2 | 74,3 | 24,1 | 52,8 | 45 | 48,8 | 132,5 | 95,1 | 119,4 | 78 |
| 1974 | 30,4 | 42,9 | 63,7 | 68,3 | 83,2 | 25,8 | 29,6 | 22,2 | 59,1 | 74 | 68,4 | 34,4 |
| 1975 | 8,3 | 51 | 52,6 | 101,7 | 61,9 | 45,6 | 32,6 | 35,2 | 73 | 84,6 | 53,1 | 83,8 |
| 1976 | 21,4 | 42 | 89 | 111,6 | 62,8 | 49,3 | 36,2 | 27,9 | 35,8 | 131,4 | 111,5 | 8,2 |
| 1977 | 6,8 | 1 | 45 | 63,1 | 43,4 | 34 | 26,2 | 33,6 | 69,6 | 44,9 | 73 | 40 |
| 1978 | 0 | 21,8 | 68,2 | 149,2 | 35,5 | 56,1 | 29,6 | 49,2 | 26,2 | 61,2 | 48,5 | 54,5 |
| 1979 | 25 | 21,8 | 64,1 | 158,3 | 99,1 | 107,5 | 31,7 | 86,6 | 32 | 222,3 | 114,4 | 38,3 |
| 1980 | 43,5 | 73,4 | 19,5 | 41,4 | 47,5 | 87,8 | 24,8 | 38,1 | 23,9 | 117,1 | 30,6 | 15,2 |
| 1981 | 56,9 | 17,1 | 12,3 | 187 | 196 | 33,5 | 22,2 | 30,1 | 39,6 | 97,5 | 49,7 | 62,4 |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120540 CHECUA

| | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|
| Latitud | 5° 8' 0,6" N | X=N= 1057580 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente R. CHECUA | Categoría CP |
| Longitud | 73° 51' 41,1" W | Y=E= 1023960 | Municipio | NEMOCON | Cuenca R. CHECUA | Fecha Instalación 1/04/1953 |
| Elevación | 2580 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 9 SABANA CENTRO | | Fecha Suspensión |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1982 | 69,3 | 31,5 | 74 | 182,7 | 85,6 | 13,5 | 37,3 | 44,7 | 20 | 85 | 56,7 | 33,6 |
| 1983 | 6,5 | 73,7 | 54,5 | 99,7 | 46,5 | 27,9 | 64,6 | 18,9 | 27,7 | 73 | 4,2 | 36,1 |
| 1984 | 31,1 | 47,9 | 58,7 | 64,2 | 43,5 | 63,1 | 24,9 | 64,6 | 88,2 | 52,4 | 74,9 | 18,8 |
| 1985 | 49,6 | 39,2 | 32,2 | 61,1 | 68,1 | 36,1 | 25,8 | 26,9 | 81,9 | 143,4 | 41,4 | 76 |
| 1986 | 6,6 | 139 | 73,4 | 46,7 | 54,1 | 77,2 | 46,6 | 23,6 | 32,7 | 134,3 | 84,1 | 7 |
| 1987 | 0 | 18,1 | 58,6 | 40,8 | 106,4 | 27,3 | 44,7 | 21 | 41,5 | 109,9 | 43,3 | 22 |
| 1988 | 2,5 | 22,8 | 34,5 | 56,7 | 51,1 | 65,1 | 22,7 | 58,7 | 82,2 | 86,7 | 78,3 | 64,1 |
| 1989 | 6,9 | 41,9 | 131,5 | 24,2 | 74,9 | 43,1 | 49,9 | 11 | 54,7 | 18,1 | 115,5 | 39,1 |
| 1990 | 6,3 | 63,9 | 38,3 | 62,8 | 72 | 22,4 | 19,9 | 31 | 3,6 | 146,6 | 82,1 | 76,6 |
| 1991 | 14,9 | 13,8 | 148,1 | 40,7 | 39,1 | 20,2 | 52,7 | 66,6 | 19,7 | 58,5 | 127,1 | 40,5 |
| 1992 | 0 | 59,2 | 20,5 | 40,9 | 31,1 | 8,4 | 56,1 | 35,7 | 75 | 21,4 | 87,6 | 82,3 |
| 1993 | 25,9 | 0 | 2,6 | 47 | 108,7 | 31,9 | 47,3 | 29,4 | 60,7 | 30,5 | 131,4 | 12,8 |
| 1994 | 45,8 | 55 | 79,7 | 62,9 | 113,9 | 19,1 | 50,3 | 36,5 | 32,9 | 93,1 | 107,3 | 8,7 |
| 1995 | 3,9 | 50,1 | 53,8 | 47,2 | 54,3 | 33,8 | 39,7 | 97,5 | 20 | 49,6 | 36,4 | 60,1 |
| 1996 | 32,5 | 35,1 | 94,1 | 60,3 | 59,4 | 57,5 | 70,3 | 53,3 | 34,1 | 118,8 | 50,3 | 64,9 |
| 1997 | 73,8 | 2,3 | 13,7 | 69,2 | 21,7 | 53,7 | 35,5 | 26,9 | 23,8 | 53,2 | 33,1 | 1,6 |
| 1998 | 2,5 | 6,1 | 39,9 | 17,5 | 131,3 | 22,6 | 58,7 | 40,1 | 44,3 | 47,1 | 50,8 | 71,6 |
| 1999 | 25,3 | 56,7 | 37,6 | 57,1 | 26,5 | | 17,2 | 37,3 | 97,4 | 140,8 | 121,5 | 39,3 |
| 2000 | 97,5 | 45,5 | 120,7 | 44 | 62,3 | 49,4 | 50,9 | 41,5 | 58,6 | 55,6 | 35,6 | 21,9 |
| 2001 | 0,2 | 42,8 | 26,9 | 12,6 | 50 | 10,2 | 47,7 | 34,9 | 51,8 | 30,4 | 49 | 31,1 |
| 2002 | 7,9 | 20 | 60,7 | 75,9 | 60,3 | 39,8 | 44,3 | 32,6 | 30,9 | 33,7 | 19,6 | 20,2 |
| 2003 | 0 | 63 | 63,4 | 41,5 | 25,9 | 33 | 43,2 | 13,4 | 28,1 | 96,2 | 70 | 22,8 |
| 2004 | 1 | 55,1 | 44,2 | 100,2 | 100,2 | 57,5 | 45,7 | 41,5 | 78,2 | 96,3 | 53 | 31,4 |
| 2005 | 4,6 | 6,1 | 8 | 83,5 | 188,9 | 55,8 | 65,3 | 38 | 78,8 | 130,6 | 89,9 | 20,8 |
| 2006 | 10,5 | 1,1 | 105,6 | 119,6 | 114,5 | 101,6 | | 0 | 38,3 | 89 | 74,4 | 26,3 |
| 2007 | 2,9 | 36,9 | 27,6 | 72,9 | 48,3 | 46,6 | 19,9 | 67,4 | 24,2 | 96 | 48,6 | 43 |
| 2008 | 30 | 39,2 | 50,9 | 38,1 | 103,7 | 83,1 | 61,8 | 76,8 | 80,5 | 67,7 | 183,4 | 57,3 |
| 2009 | 71,7 | 21,6 | 87,2 | 67,4 | 75 | 50,2 | 30,8 | 40,3 | 35,1 | 47,7 | 20,1 | 0 |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120540 CHECUA

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|-----------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|
| Latitud | 5° 8' 0,6" N | X=N= 1057580 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | CP |
| Longitud | 73° 51' 41,1" W | Y=E= 1023960 | Municipio | NEMOCON | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/04/1953 |
| Elevación | 2580 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 9 SABANA CENTRO | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2010 | 0 | 5 | 4,5 | 252,9 | 137,7 | 65,5 | 84,3 | 44,3 | 64,7 | 113 | 105,2 | 52,5 |
| 2011 | 37,7 | 89,4 | 141 | 282,7 | 126,2 | 97,7 | 42 | 52,4 | 38,7 | 174,7 | 225,5 | 34,4 |
| 2012 | 52,5 | 12,5 | 66,9 | 162,2 | 33,1 | 64,7 | 97,9 | 55,4 | 26,3 | 137,6 | 29,2 | 30,6 |
| 2013 | 6,3 | 43,8 | 97 | 129,5 | 110,6 | 13 | 34,1 | 40,7 | 23,2 | 50,6 | 141,7 | 42,2 |
| 2014 | 49 | 35,8 | 52,5 | 29,2 | 44,5 | 39,6 | 26,9 | 21,5 | 21,1 | 60,3 | 82,5 | 55,1 |
| 2015 | 5,8 | 21,9 | 14,3 | 24,3 | 17,3 | 51,5 | 44,2 | 35,1 | 10,4 | 37,8 | 32,8 | 2,6 |
| 2016 | 34,2 | 2,8 | 63,7 | 74,7 | 57,1 | 30,4 | 39,4 | 35,6 | 70,9 | 109,1 | 61,2 | 24,6 |
| 2017 | 55,4 | 18,7 | 124,9 | 45,6 | 69,1 | 69,2 | 35,3 | 71,9 | 24,9 | 38,4 | 48 | 74,7 |
| 2018 | 25,2 | 89,2 | 75,7 | 99,1 | 75,8 | 58,1 | 73,9 | 27,6 | 44,8 | 72,9 | 39,4 | 0 |
| 2019 | 7,2 | 15,5 | 67,6 | 78,4 | | | | | | | | |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120168 ALTO DE AIRE

| | | | | | | | | |
|-----------|---------------|--------------|--------------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| Latitud | 5°11' 33,5" N | X=N= 1065960 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | PG |
| Longitud | 73° 49' 9" W | Y=E= 1028640 | Municipio | UCUNUBA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/9/1986 |
| Elevación | 2796 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 14 UBATÉ | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1986 | | 22,6 | 82,7 | 71,8 | 45,6 | 70,6 | 14,2 | 5,1 | 51,5 | 151,1 | 111,4 | 17,7 |
| 1987 | 11,2 | 37,3 | 24,3 | 56,9 | 137,1 | 54,9 | 71,7 | 18,3 | 24 | 107,2 | 72 | 47,3 |
| 1988 | 17,8 | 40,8 | 67,4 | 36,7 | 7,5 | 50,2 | 35,8 | 57,4 | 71,7 | 122,4 | 82,9 | 45,3 |
| 1989 | 13,5 | 41,5 | 164,3 | 36 | 97,5 | 53,3 | 73,8 | 18,2 | 40,2 | 36,1 | 91,6 | 45,4 |
| 1990 | 12 | 72,8 | 91,7 | 72,4 | 102,4 | 46,9 | 36,6 | 49,8 | 8,2 | 81,7 | 43,7 | 94 |
| 1991 | 17,1 | 23,2 | 82,9 | 70,2 | 68,7 | 37,8 | 88,5 | 75,1 | 24 | 24,2 | 132,9 | 59,8 |
| 1992 | 29,6 | 59,4 | 38,7 | 48,3 | 30,2 | 26,7 | 43,8 | 50,2 | 48,7 | 15,2 | 82,5 | 33,1 |
| 1993 | 23,8 | 54,8 | 52,8 | 71,4 | 152,3 | 49 | 70,1 | 55,9 | 37,4 | 27,2 | 168,4 | 4,2 |
| 1994 | 35,4 | 33,8 | 56,5 | 66,9 | 65,2 | 44,3 | 64,5 | 43,1 | 69,6 | 133,7 | 79,3 | 6,9 |
| 1995 | 7,2 | 37,2 | 101,2 | 92,9 | 46,7 | 53,6 | 49,8 | 90,9 | 33,4 | 61 | 70,8 | 61,6 |
| 1996 | 23,1 | 55,5 | 71,1 | 102 | 72,6 | 34,4 | 76,1 | 38,4 | 24,2 | 133,1 | 94,5 | 122,4 |
| 1997 | 88,7 | 16,7 | 40,6 | 59,2 | 35,8 | 73,9 | 72,3 | 53,2 | 35,1 | 34,5 | 37,9 | 5,9 |
| 1998 | 4,7 | 18,9 | 121,7 | 31,3 | 114,5 | 99,1 | 83,6 | 47,1 | 36,6 | 28,2 | 95 | 99,6 |
| 1999 | 60,9 | 69,3 | 28,5 | 21,9 | 39,6 | 41,4 | 32,3 | 59,8 | 102,3 | 129,6 | 71,8 | 39,1 |
| 2000 | 34,2 | 49,4 | 145,6 | 66,6 | 73,2 | 68,7 | 59,2 | 58,4 | 81,1 | 47 | 63,8 | 52,1 |
| 2001 | 0,8 | 28,7 | 65,9 | 31,4 | 47,8 | 39,2 | 39,3 | 60,6 | 65,6 | 74,3 | 55,6 | 23,5 |
| 2002 | 7,3 | 6 | 110 | 102,4 | 108,3 | 81,5 | 49,8 | 40,7 | 36,9 | 24,6 | 35,7 | 11,5 |
| 2003 | 3,2 | 8 | 85,2 | 61,8 | 68 | 41 | 62,4 | 14,8 | 38,1 | 135,6 | 91,3 | 48,8 |
| 2004 | 20,3 | 9,5 | 34,1 | 80,2 | 104,7 | 87,7 | 56,1 | 88,7 | 20,7 | 35,3 | 48,2 | 67,4 |
| 2005 | 30 | 28,3 | 29 | 93,3 | 103 | 27,4 | 38,8 | 70,5 | 65,4 | 158,3 | 149,6 | 3 |
| 2006 | 21 | 32,3 | 111,5 | 127,5 | 113,8 | 114,5 | 30 | 48,5 | 17,3 | 76 | 59,2 | 16 |
| 2007 | 3,4 | 12,9 | 35,3 | 75,7 | 31 | 43,8 | 21 | 40,1 | 13 | 168,1 | 53,7 | 102,3 |
| 2008 | 30,3 | 55,1 | 102,2 | 56,1 | 134 | 68,4 | 64,3 | 54,3 | 62,5 | 66,9 | 212,7 | 46,1 |
| 2009 | 43,9 | 21 | 97,2 | 36 | 24,1 | 45,4 | 57,1 | 29,8 | 34,8 | 86,1 | 40,5 | 1,8 |
| 2010 | 9,7 | 10,2 | 8 | 222,2 | 186,3 | 70,1 | 112,5 | 41,8 | 42 | 68,9 | 99,5 | 61,6 |
| 2011 | 32,9 | 49,5 | 178 | 272,2 | 146,2 | 68 | 26,4 | 43,4 | 37,5 | 124,6 | 154,8 | 39,4 |
| 2012 | 48,6 | 51,7 | 117,2 | 217,7 | 36,7 | 50,2 | 74,3 | 55,3 | 24,4 | 67,5 | 37,5 | 16,1 |
| 2013 | 23,4 | 29,7 | 89,1 | 83,3 | 117,2 | 30,9 | 50,8 | 54 | 30,1 | 31,5 | 123,6 | 61,9 |
| 2014 | 30,8 | 48,1 | 107,9 | 40 | 36,2 | 60,9 | 59,3 | 29,9 | 31,9 | 40,5 | 91,1 | 58,7 |
| 2015 | 16 | 15,7 | 66 | 41 | 36,3 | 131,5 | 57,8 | 49,7 | 9,7 | 14,1 | 80,9 | 16,7 |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
 SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120168 ALTO DE AIRE

| | | | | | | | | | |
|-----------|---------------|------|---------|--------------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| Latitud | 5°11' 33,5" N | X=N= | 1065960 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | PG |
| Longitud | 73° 49' 9" W | Y=E= | 1028640 | Municipio | UCUNUBA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/9/1986 |
| Elevación | 2796 m.s.n.m | | | Oficina Provincial | 14 UBATÉ | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2016 | 6,6 | 3 | 83,7 | 87,7 | 92,6 | 43,5 | 50,9 | 27,1 | 48,7 | 76,6 | 60,9 | 47,4 |
| 2017 | 51,6 | 29,4 | 168,5 | 60,1 | 93,2 | 77,6 | 43,8 | 60,3 | 13,5 | 69,6 | 33,8 | 83,5 |
| 2018 | 83,3 | 62,4 | 75,5 | 161,9 | 69,5 | 58,2 | 77,3 | 26,2 | 18 | 77,8 | 57,3 | 0 |
| 2019 | 18 | 19,4 | 39,7 | 120,5 | 75,1 | 83,4 | | | | | | |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120170 LLANO EL

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| Latitud | 5°10' 21,2" N | X=N= 1063740 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | PG |
| Longitud | 73° 49' 40,9" W | Y=E= 1027660 | Municipio | TAUSA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/3/1988 |
| Elevación | 2838 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 14 UBATÉ | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1988 | | | 0,2 | 99,4 | 48 | 57,7 | 45,5 | 67,1 | 63,9 | 123,7 | 73,2 | 69,9 |
| 1989 | 17,8 | 25,4 | 131,9 | 47,2 | 90,4 | 55,8 | 71,4 | 17,9 | 51,4 | 25,4 | 72,1 | 34,9 |
| 1990 | 5,9 | 50,2 | 57,9 | 118,4 | 96,3 | 53 | 36,7 | 48,3 | 9,6 | 110,7 | 38,3 | 57,5 |
| 1991 | 15,2 | 17,6 | 124,2 | 48,1 | 55,8 | 28,8 | 87,3 | 67,8 | 32,4 | 33,9 | 145,2 | 59,6 |
| 1992 | 21,5 | 69,4 | 18,4 | 37,5 | 33,7 | 18,5 | 47,2 | 35,8 | 41,6 | 5,4 | 101,8 | 69,6 |
| 1993 | 29 | 36,2 | 41,1 | 27 | 55,2 | 44,9 | 45,8 | 26,2 | 41,7 | 25,5 | 116,6 | 18,5 |
| 1994 | 39,7 | 40,1 | 56,3 | 54,2 | 65,5 | 38 | 62,8 | 33,5 | 54,1 | 91,3 | 62,1 | 6 |
| 1995 | 3,5 | 14,2 | 84,3 | 78,1 | 35,4 | 34,8 | 33,7 | 49,2 | 24,4 | 55,7 | 48,1 | 59,5 |
| 1996 | 18,1 | 39,8 | 74,4 | 80,2 | 59,2 | 33,1 | 60,6 | 40,5 | 31,2 | 126 | 66,8 | 89,2 |
| 1997 | 96,8 | 8,9 | 16,7 | 50,8 | 32,8 | 69 | 74,5 | 46,8 | 25 | 53,6 | 43,3 | 4,3 |
| 1998 | | | 126 | 25,8 | 128,8 | 34,9 | 91,3 | 40,9 | 20,9 | 37,3 | 69,1 | 90,4 |
| 1999 | 39,5 | 68,7 | 69,7 | 26,1 | 43,2 | 16,8 | 37,4 | 35,1 | 55,9 | 59,3 | 52,1 | 30,5 |
| 2000 | 5,6 | 42,8 | 167,4 | 82,4 | 66,7 | 56,8 | 61,5 | 61,7 | 80,1 | 58,4 | 87,1 | 37,3 |
| 2001 | 0 | 27,4 | 50,4 | 17,2 | 61 | 34,4 | 37,1 | 53,2 | 64 | 63,5 | 53,4 | 29,7 |
| 2002 | 7,3 | 25 | 105,5 | 62,2 | 79,6 | 55,9 | 44,3 | 45,6 | 31 | 25,3 | 32,3 | 10,6 |
| 2003 | 13,8 | 39,3 | 71,8 | 56 | 10,2 | | 1,5 | 0,8 | 1,2 | 3,5 | 1,6 | 4,7 |
| 2005 | | 1,3 | 19,1 | 84,1 | 101,9 | 32,3 | 105,8 | 58 | 48,5 | 147 | 152,1 | 4,1 |
| 2006 | 26,8 | 14,4 | 113,3 | 142,8 | 99,6 | 111,4 | 33,7 | 50 | 17,9 | 75,5 | 79,8 | 19,7 |
| 2007 | 3,5 | 14,9 | | 90,1 | 77 | 41,1 | 26,4 | 64,2 | 12,7 | 126,4 | 52,9 | 84,8 |
| 2008 | 28,7 | 44,9 | 86 | 69,1 | 113,8 | 68 | 57 | 46,8 | 64,1 | 52,7 | 203,5 | 38 |
| 2009 | 59,3 | 19,8 | 103,1 | 47 | 65,8 | 38,7 | 54,8 | 34,1 | 27 | 55,2 | 38,2 | 0 |
| 2010 | 0 | 0 | 4,4 | 218,3 | 170,5 | 72,5 | 111,2 | 41,3 | 49,7 | 136,7 | 98,9 | 60 |
| 2011 | 19,8 | 112,8 | 147,8 | 323,7 | 120,9 | 64,3 | 77,2 | 48,1 | 53,4 | 126,4 | 166,3 | 52 |
| 2012 | 33,5 | 44,8 | 101 | 250,9 | 37,7 | 64,5 | 79,9 | 48,3 | 24,6 | 80,4 | 30,8 | 14,3 |
| 2013 | 11,5 | 39,4 | 96,4 | 96,2 | 117,6 | 23,9 | 45,5 | 57,1 | 28,5 | 58,8 | 121,4 | 49,2 |
| 2014 | 22,2 | 64,9 | 50,3 | 39,9 | 43,7 | 66,1 | 61,3 | 33,9 | 35,4 | 49,6 | 85,9 | 47,9 |
| 2015 | 17,4 | 23,7 | 52,5 | 20,1 | 33,1 | 116,2 | 54,4 | 39,8 | 16,9 | 21,6 | 67,2 | 14,4 |
| 2016 | 12,1 | 1,4 | 84,9 | 78,2 | 64,3 | 49,7 | 45,2 | 50,9 | 60,8 | 77,7 | 93,8 | 44 |
| 2017 | 66,9 | 30,6 | 149,6 | 64,8 | 83,1 | 82,1 | 45,4 | 21,9 | 21,5 | 50 | 35,4 | 73,8 |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
 SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120170 LLANO EL

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| Latitud | 5°10' 21,2" N | X=N= 1063740 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | PG |
| Longitud | 73° 49' 40,9" W | Y=E= 1027660 | Municipio | TAUSA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/3/1988 |
| Elevación | 2838 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 14 UBATÉ | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2018 | 36,7 | 97,1 | 71 | 133 | 67,1 | 63,1 | 80,4 | 32,5 | 18 | 114,6 | 85,8 | 1,4 |
| 2019 | 17,4 | 21 | 74,8 | 97 | 60,4 | 80,3 | | | | | | |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120095 BARRANCAS

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| Latitud | 5°10' 3,6" N | X=N= 1063200 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | CO |
| Longitud | 73° 48' 50,2" W | Y=E= 1029220 | Municipio | TAUSA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/8/1966 |
| Elevación | 2913 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 14 UBATÉ | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1966 | | | | | | | | 20 | 45 | 102 | 108,7 | 93 |
| 1967 | 12 | 13 | 108 | 92 | 57 | 85 | 51 | 52 | 38 | 74 | 100 | 59 |
| 1968 | 11 | 101 | 16 | 152 | 42 | 158 | 51 | 44 | 70 | 62 | 59 | 11 |
| 1969 | 50,6 | 16,3 | 1,4 | 191,8 | 71,8 | 38,3 | 36,7 | 27 | 25 | 136,4 | 64,9 | 10,4 |
| 1970 | 22,8 | 57,8 | 17,6 | 29,1 | 78 | 40,5 | 55,2 | 16,9 | 96,4 | 141,8 | 65,4 | 10 |
| 1971 | 50,2 | 57 | 69,6 | 88,8 | 82,5 | 41,5 | 47,4 | 33,9 | 36,6 | 52,9 | 49,4 | 50,6 |
| 1972 | 94,2 | 6,8 | 35,5 | 135,3 | 77,1 | 75,1 | 62,8 | 37,5 | 29,1 | 42 | 73,5 | 13 |
| 1973 | 5,1 | 33,8 | 12,4 | 36,5 | 63,6 | 46,3 | 54,2 | 61,3 | 129,3 | 96 | 104 | 89 |
| 1974 | 35 | 69,2 | 53,8 | 80,3 | 92,6 | 31,6 | 33 | 23,2 | 55,8 | 55,1 | 117,6 | 20 |
| 1975 | 4,8 | 65,3 | 59,8 | 53 | 78,5 | 56,5 | 39,6 | 40,4 | 43,3 | 114,4 | 49,6 | 118,8 |
| 1976 | 7,9 | 21,5 | 84,9 | 32,3 | 86,9 | 108,9 | 17,2 | 34 | 40,5 | 108 | 88,8 | 12,9 |
| 1977 | 6,3 | 1,3 | 54 | 79,4 | 29,5 | 36,1 | 19 | 56,5 | 66,6 | 61,8 | 117,5 | 35,7 |
| 1978 | 1,3 | 28,5 | 36,2 | 143,2 | 50,9 | 50,8 | 49,1 | 40,7 | 49,4 | 106,5 | 55,8 | 30,7 |
| 1979 | 26,5 | 44,1 | 65,6 | 148,2 | 73 | 87,2 | 39,9 | 68,8 | 18,6 | 286 | 112,8 | 51,7 |
| 1980 | 10,6 | 85,4 | 29,8 | 50,7 | 60,3 | 99,3 | 49 | 53,8 | 31,7 | 118,7 | 44,5 | 36,5 |
| 1981 | 7,6 | 55,9 | 6,4 | 161,4 | 219,7 | 31,9 | 27,7 | 69,7 | 52,2 | 127,6 | 87,7 | 50,5 |
| 1982 | 34,6 | 64,7 | 51,1 | 210,5 | 74,8 | 39,9 | 69,8 | 66 | 40,2 | 82,2 | 61,2 | 24,7 |
| 1983 | 13,1 | 38,4 | 91,7 | 99,8 | 54 | 30,1 | 65 | 36,5 | 27 | 73,7 | 9,7 | 30,6 |
| 1984 | 29,1 | 59,8 | 54,1 | 98,3 | 58,7 | 88 | 35,8 | 68,1 | 58 | 44,5 | 59,2 | 14,8 |
| 1985 | 33,5 | 14,2 | 47 | 70,3 | 110,6 | 62,9 | 42,6 | 39,3 | 64,9 | 112,6 | 63,7 | 111,7 |
| 1986 | 16,9 | 85,4 | 113,5 | 40 | 40,1 | 72,7 | 72,7 | 41,8 | 49,7 | 114,1 | 93,6 | 10,2 |
| 1987 | 19,4 | 39,5 | 16,3 | 57,7 | 86,9 | 37,3 | 68,1 | 46,1 | 46,5 | 133,1 | 54,3 | 27,6 |
| 1988 | 4,7 | 19,5 | 25,7 | 74,3 | 51,4 | 44,8 | 41,4 | 56,7 | 50,7 | 97,2 | 59,8 | 63,6 |
| 1989 | 19,7 | 33,2 | 124,7 | 38,3 | 78,1 | 49,9 | 79,6 | 22 | 57 | 17 | 75 | 40 |
| 1990 | 8 | 86 | 63 | 122 | 114 | 31,3 | 25,3 | 50,3 | 2,8 | 11,9 | 45,4 | 62 |
| 1991 | 18 | 22 | 105 | 49 | 41 | 34 | 89 | 95 | 40 | 34 | 79 | 60,1 |
| 1992 | 26 | 73,5 | 16,5 | 34,8 | 28,4 | 24,9 | 67,4 | 48 | 49,1 | 10,4 | 104,5 | 51,9 |
| 1993 | 5,7 | 33,4 | 50,5 | 47 | 130,4 | 73,7 | 63 | 40,4 | 39,7 | 42,5 | 120,6 | 6 |
| 1994 | 38,2 | 32 | 70 | 45,2 | 79,6 | 45,1 | 90 | 40,8 | 84 | 115,9 | 67,9 | 4,9 |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120095 BARRANCAS

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|----------|
| Latitud | 5°10' 3,6" N | X=N= 1063200 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | CO |
| Longitud | 73° 48' 50,2" W | Y=E= 1029220 | Municipio | TAUSA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/8/1966 |
| Elevación | 2913 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 14 UBATÉ | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1995 | 5 | 14 | 87 | 133,9 | 50,8 | 44,4 | 51,2 | 66,8 | 27,3 | 73,3 | 46 | 59 |
| 1996 | 22 | 30 | 84 | 107 | 79,1 | 41 | 65 | 52,4 | 58,5 | 145,5 | 90,9 | 95,9 |
| 1997 | 64,7 | 7,4 | 20,6 | 38,1 | 39,6 | 44,9 | 99,8 | 66,2 | 26,4 | 43,6 | 39,7 | 4,2 |
| 1998 | 2 | 10,3 | 165,6 | 25,8 | 96,1 | 43,9 | 94,8 | 29,1 | 18,4 | 32,1 | 58,9 | 77,6 |
| 1999 | 44 | 94,8 | 68,9 | 63,2 | 47,3 | 35 | 16,5 | | 100,1 | 147,9 | 92,8 | 38 |
| 2000 | 72,5 | 51 | 158,5 | 97,1 | 97,5 | 93,5 | 51 | 78 | 95 | 76 | 84 | 38 |
| 2001 | 0 | 28,5 | 45,6 | 10,5 | 57 | 34,5 | 30,7 | 42,6 | 57,1 | 45,6 | 49,9 | 18,4 |
| 2002 | 6,5 | 33,6 | 88,5 | 36,6 | 60,4 | 87,1 | 52,1 | 61,9 | 6,7 | 9,4 | 27,3 | 11,3 |
| 2003 | 0 | 5,2 | 67 | 37 | 26 | 23 | 54 | 17 | 17 | 25 | 51 | 58 |
| 2004 | 23 | 30 | 27 | 102,2 | 171,5 | 215,5 | 201 | 49 | 193 | | | 34,5 |
| 2005 | 55,4 | 10 | 19,1 | 102,1 | 106 | 31,7 | 45,6 | 29,2 | 58,4 | 138,8 | 125,6 | 3,3 |
| 2006 | 32,2 | 18,9 | 127,6 | 126,2 | 98,9 | 124,6 | 58 | 55,8 | 26,5 | 71,7 | 73,5 | 36,8 |
| 2007 | 3,5 | 12,3 | | | | | 27,7 | | 21,8 | 146,2 | 41,6 | |
| 2008 | 33,8 | 25,7 | | | | | | | | | | |
| 2009 | 62,4 | 23,4 | 89,3 | 63,4 | 69,2 | 28,5 | | 24,1 | 36,4 | 76,9 | 37,2 | 0,2 |
| 2010 | 0,1 | 11,8 | 10,2 | 233,3 | 117,8 | 74,4 | 109 | 49,7 | 45,1 | 103,2 | 96,4 | 69,6 |
| 2011 | 24 | 97,5 | 150,6 | 341,6 | 163,7 | 81,9 | 77,4 | 51,9 | 50,1 | 111,5 | 153,5 | 48,7 |
| 2012 | 53,2 | 32,3 | 90,1 | 237 | 37,7 | 64,6 | 96,3 | 52,8 | 29,9 | 98,4 | 42,4 | 29,3 |
| 2013 | 9,8 | 59 | 81,6 | 105,1 | 114,1 | 26,3 | 57,5 | 62,1 | 37,1 | 62,3 | 122,4 | 41,9 |
| 2014 | 23,5 | 31,1 | 52,4 | 40,4 | 64,1 | 74,8 | 70,8 | 37,4 | 40,8 | 37 | 94,8 | 41,1 |
| 2015 | 23,5 | 15,5 | 41,6 | 18,3 | 46,2 | 159,6 | 65,9 | 50,1 | 11,5 | 19,4 | 73,2 | 18,7 |
| 2016 | 8,9 | 1,1 | 81,6 | 49,6 | 64,7 | 63,3 | 53,9 | 60,5 | 47,9 | 106,1 | 57,7 | 52,1 |
| 2017 | 62,4 | 44,2 | 133,5 | 61,2 | 78,1 | 94,1 | 39,4 | 22,6 | 25,7 | 52,1 | 38 | 86,4 |
| 2018 | 28,6 | 81,8 | 89,6 | 136,7 | 61,3 | 63,3 | 75,6 | 38,8 | 14,6 | 96,2 | 40,5 | 2 |
| 2019 | 14,1 | 19,4 | 57,2 | | | | | | | | | |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120141 ACANDY

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|-----------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|
| Latitud | 5° 3' 50,7" N | X=N= 1051750 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | PM |
| Longitud | 73° 53' 56,7" W | Y=E= 1019780 | Municipio | TAUSA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/10/1967 |
| Elevación | 2596 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 9 SABANA CENTRO | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1977 | | | | | | | | | | 67 | 133 | 67 |
| 1978 | 0 | 16,2 | 60,5 | 161,2 | 56,7 | 94,5 | 49 | 59,4 | 80,2 | 56,5 | 39 | 47 |
| 1979 | 12 | 17 | 97 | 191 | 131 | 130 | 74 | 100 | 44 | 224 | 137 | 44 |
| 1980 | 45 | 72 | 19 | 40 | 47 | 74 | 33 | 35 | 21 | 114 | 44 | 33 |
| 1981 | 30 | 13 | 10 | 173 | 155 | 65 | 47 | 96 | 91 | 65 | 70 | 76 |
| 1982 | 77 | 70 | 83 | 246 | 107 | 18 | 42 | 32 | 48 | 86 | 53 | 10 |
| 1983 | 7 | 35 | 55 | 54 | 45 | 19 | 41 | 14 | 9 | 23 | 12 | 19 |
| 1984 | 20 | 26 | 61 | 75 | 119 | 87 | 42 | 76 | 130 | 79 | 76 | 18 |
| 1985 | 28 | 11 | 18 | 46 | 95 | 67 | 116 | 59 | 105 | 115 | 85 | 124 |
| 1986 | 62 | 146 | 99 | 47 | 126 | 120 | 52 | 41 | 90 | 293 | 100 | 9 |
| 1987 | 22 | 49 | 73 | 62 | 127 | 55 | 53 | 59 | 62 | 197 | 79 | 63 |
| 1988 | 12 | 11 | 83 | 50 | 71 | 55 | 52 | 86 | 87 | 107 | 161 | 45 |
| 1989 | 47 | 62 | 142 | 53 | 117 | 55 | 89 | 34 | 41 | 38 | 81 | 86 |
| 1990 | 12 | 48 | 85 | 140 | 122 | 0 | 11 | 81 | 27 | 189 | 69,5 | 77 |
| 1991 | 32 | 18 | 193 | 64 | 33 | 31 | 99 | 76 | 10 | 149 | 112 | 40 |
| 1992 | 4 | 15 | 40 | 68 | 15 | 19 | 151 | 52 | 40 | 19 | 143 | 45 |
| 1993 | 17 | 11 | 57 | 104 | 163 | 67 | 95 | 35 | 76 | 32 | 67 | 19 |
| 1994 | | | | | 111,5 | 31,1 | 50,1 | 47,2 | 52,4 | 145,8 | 116,4 | 14 |
| 1995 | 22,3 | 44,1 | 80,1 | 50,7 | 56,1 | 63,3 | 56,5 | 111,4 | 11,6 | 40,6 | 41 | 72,1 |
| 1996 | 37,4 | 62,6 | 113 | 73,9 | 92,3 | 56,9 | 83,6 | 49,6 | 116,9 | 104,6 | 51,1 | 54,8 |
| 1997 | 80,5 | 9,3 | 18,7 | 100,9 | 26,3 | 68,5 | 100,6 | 37,6 | 49,1 | 67,7 | 4,5 | 1,9 |
| 1998 | 7,4 | 48,3 | 99 | 43,7 | 253,3 | 68,5 | 99,1 | 58,9 | 34,8 | 92,8 | 33,8 | 92,1 |
| 1999 | 20,4 | 56,1 | 116,4 | 24,8 | 56,3 | 84,1 | 33,7 | 51,2 | 94,7 | 125,3 | 116,5 | 35,3 |
| 2000 | 47,7 | 36,4 | 44 | 13,5 | 23,3 | 23,7 | 33,6 | 24,3 | 78,9 | 88,1 | 47,6 | 17 |
| 2001 | 0 | 49,8 | 59,7 | 17,9 | 60,6 | 34,2 | 39,9 | 61,5 | 97,4 | 47,2 | 104,3 | 35,3 |
| 2002 | 31,3 | 33,8 | 82 | 125,8 | 141,4 | 56,3 | 73,2 | 67,3 | 54 | 51,2 | 22,6 | 19,8 |
| 2003 | 30,2 | 57,1 | 66,3 | 104,3 | 47,3 | | | | | | 1,2 | 25 |
| 2004 | 72,8 | 59,9 | 49 | 133,3 | 171,4 | 73,3 | 59,8 | 42,3 | 81,1 | 144,1 | 28,6 | 26,1 |
| 2005 | 6 | 57 | 24,1 | 92 | 117,5 | 70,4 | 46,5 | 61,1 | 52,4 | 163,9 | 96,8 | 52,8 |
| 2006 | 29,4 | 64,4 | 113,8 | 182,8 | 147,6 | 97,6 | | 59,3 | 34,1 | 106,6 | 91,9 | 21 |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm)

ESTACIÓN: 2120141 ACANDY

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|-----------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|
| Latitud | 5° 3' 50,7" N | X=N= 1051750 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | PM |
| Longitud | 73° 53' 56,7" W | Y=E= 1019780 | Municipio | TAUSA | Cuenca | R. CHECUA | Fecha Instalación | 1/10/1967 |
| Elevación | 2596 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 9 SABANA CENTRO | | | Fecha Suspensión | |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2007 | 14,4 | 27,5 | 66,6 | 132 | 85,9 | 66,3 | 51,3 | 78,1 | 47,7 | 117,3 | 48,1 | 55 |
| 2008 | 26,6 | 34,7 | 64,7 | 88,4 | 129,1 | 92,6 | 98,7 | 81,1 | 72,4 | 96,9 | 102,7 | |
| 2009 | 58 | 47,6 | 38,6 | 71,5 | 64 | 33,5 | 55,3 | 50,4 | 38 | 86,3 | 41,1 | 0 |
| 2010 | 0 | 2,5 | 13,4 | 141,5 | 100,2 | 87,1 | 124,3 | 66,1 | 96,9 | 91,9 | 208,2 | 61,5 |
| 2011 | 12,8 | 133,6 | 140,3 | 246,3 | 115,8 | 163,4 | 59,3 | 74,4 | 37,4 | 243,6 | 179,5 | 73,8 |
| 2012 | 38,8 | 19,9 | 83,3 | 180,6 | 51,1 | 89,1 | 126,1 | 68,9 | 32,6 | 125,1 | 32,4 | 16,7 |
| 2013 | 15,3 | 86,8 | 63,1 | 131,7 | 130,9 | 21,1 | 30,6 | 57,8 | 53,3 | 76,8 | 128,3 | 71 |
| 2014 | 5,7 | 29,1 | 164 | 45,9 | 85,5 | 56,1 | 75,9 | 42 | 31,9 | 69,1 | 75,5 | 58,7 |
| 2015 | 5,1 | 35,8 | 36,2 | 43,4 | | | | 52,1 | 15,9 | | | |
| 2016 | 43,5 | 16,2 | 85,8 | 43,1 | 42,9 | 44,3 | 56 | 63,7 | 36,5 | 100 | 76,6 | 85,8 |
| 2017 | 130,8 | 13,4 | 156,4 | 40 | 27,5 | 98,5 | 52,2 | 69,7 | 22,5 | 30,1 | 56,3 | 78,5 |
| 2018 | 17 | 39,3 | 50,7 | 143,7 | 79 | 62,8 | 83,3 | 56,5 | 59,8 | 88,5 | 73,7 | 8 |
| 2019 | 35,3 | 12,4 | 80,9 | 144,9 | 47 | | | | | | | |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C)

ESTACIÓN: 2120540 CHECUA

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|--------------|--------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| Latitud | 5° 8' 0,6" N | X=N= 1057580 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | CP |
| Longitud | 73° 51' 41,1" W | Y=E= 1023960 | Municipio | NEMOCON | Cuenca | R. CHECUA | Fecha | Instalación 1/04/1953 |
| Elevación | 2580 m.s.n.m | | Oficina Provincial | 9 SABANA CENTRO | | | Fecha | Suspensión |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1961 | 12,2 | 10,7 | 12,7 | 12,5 | 12,2 | 11,7 | 11,9 | 11,7 | 11,5 | 12 | 11,7 | 11,1 |
| 1962 | 11,4 | 12 | 11,5 | 12 | 11,4 | 10,8 | 10,8 | 10,9 | 10,9 | 11,7 | 11,4 | 11,1 |
| 1963 | 11,5 | 11,5 | 12,3 | 11,8 | 12,3 | 11,4 | 11,2 | 11,4 | 11 | 11,7 | 11,7 | 11,6 |
| 1964 | 10,7 | 11,6 | 12,2 | 12 | 11,5 | 11,1 | 10,3 | 11,5 | 10,5 | 10,8 | 11,1 | 11,1 |
| 1965 | 11,7 | 11,3 | 12,9 | 11,8 | 11,5 | 10,7 | 11,3 | 11 | 11,6 | 12 | 12,2 | 11,4 |
| 1966 | 11,1 | 12 | 11,8 | 12 | 12 | 11,7 | 11 | 11 | 11,1 | 11,5 | 11,4 | 11,5 |
| 1967 | 10,4 | 12 | 11,7 | 11,1 | 11,4 | 10,4 | 10 | 10,1 | 10,1 | 11 | 11,6 | 10,7 |
| 1968 | 10,3 | 11,7 | 11,5 | 11,7 | 11,3 | 10,6 | 10,1 | 10,3 | 10,6 | 11,3 | 11,2 | 10,2 |
| 1969 | 10,4 | 12 | 12,2 | 12,5 | 11,8 | 11,3 | 10,2 | 10,6 | 11 | 11,2 | 11,2 | 10,7 |
| 1970 | 10,8 | 11,3 | 12,3 | 12,5 | 12,1 | 11,3 | 10,9 | 10,9 | 10,8 | 11,3 | 11,6 | 10,8 |
| 1971 | 11,8 | 10,3 | 12,3 | 12,1 | 12,6 | 11,3 | 11,8 | 10,4 | 11,8 | 12,1 | 10,9 | 10,5 |
| 1972 | 13,5 | 13,8 | 15 | 14,7 | 14,7 | 13,9 | 13,5 | 13,6 | 13,9 | 13,9 | 14,5 | 14,4 |
| 1973 | 13,9 | 14,5 | 15,5 | 14,9 | 14,4 | 13,4 | 12,9 | 13,2 | 12,8 | 13,1 | 13,6 | 12,9 |
| 1974 | 12,4 | 14 | 13,5 | 13,4 | 12,9 | 12,9 | 12,7 | 12,7 | 12,7 | 12,8 | 14 | 12,5 |
| 1975 | 12,7 | 13,5 | 13,4 | 13,8 | 13,5 | 13,1 | 13 | 13,1 | 13,1 | 13,1 | 13,9 | 13,1 |
| 1976 | 13,3 | 14 | 14,2 | 13,6 | 13,1 | 12,5 | 12,3 | 12,4 | 13 | 14,1 | 13,7 | 13,4 |
| 1977 | 13,9 | 14,3 | 14,8 | 14,8 | 14,2 | 13,9 | 13,7 | 14 | 13,8 | 14,5 | 14,4 | 14,1 |
| 1978 | 13,6 | 14,5 | 14,4 | 14,5 | 14,2 | 13,6 | 13,5 | 13,2 | 13,3 | 13,5 | 11,7 | 11,4 |
| 1979 | 11,9 | 11,3 | 12,4 | 12,4 | 11,7 | 11,6 | 11,3 | 11,6 | 11,8 | 12,1 | 11,1 | 10 |
| 1980 | 10,4 | 10,5 | 10,9 | 11 | 10,8 | 10,3 | 10,4 | 9,7 | 10,6 | 10,5 | 10,9 | 10,6 |
| 1981 | 10,2 | 11,4 | 13,4 | 12,6 | 13,3 | 13,3 | 12,9 | 13,3 | 12,9 | 13,7 | 14,4 | 13,3 |
| 1982 | 13,3 | 12,8 | 12,4 | 12,8 | 13,5 | 13,4 | 14,7 | 14,1 | 14,2 | 13,3 | 13,5 | 12,9 |
| 1983 | 13,7 | 14,4 | 14,1 | 14,2 | 14 | 13,3 | 14 | 14,1 | 14,2 | 14,3 | 14,5 | 14,4 |
| 1984 | 14 | 14,5 | 15,6 | 15,8 | 15,7 | 14,8 | 14,6 | 14,9 | 14,9 | 15 | 15,2 | 14,7 |
| 1985 | 15,2 | 14 | 15,6 | 15,7 | 15,5 | 14,9 | 14,9 | 15 | 15,4 | 15,6 | 15,7 | 15,5 |
| 1986 | 17,1 | 17,3 | 17,6 | 17,5 | 17,6 | 17,1 | 15,8 | 17 | 16,3 | 14,7 | 14,4 | 14,2 |
| 1987 | 14,2 | 13,4 | 13,4 | 13,3 | 13 | 12,6 | 13 | 12,6 | 12,9 | 13,4 | 15,1 | 14,1 |
| 1988 | 12,2 | 13 | 12,3 | 13,7 | 14,4 | 14,1 | 13,9 | 14,4 | 14,1 | 14,1 | 15 | 13,9 |
| 1991 | 14,8 | 15,8 | 15,8 | 15,6 | 13,7 | 13,2 | 12,7 | 12 | 13,3 | 12,7 | 12,8 | 13,9 |
| 1992 | 13,9 | 14,2 | 15 | 15 | 14,8 | 13,8 | 12,8 | 13,4 | 13,6 | 13,6 | 14,1 | 14,7 |

C A R - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
SICLICA - Sistema de Información Climatológica e Hidrológica

VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C)

ESTACIÓN: 2120540 CHECUA

| | | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|------|---------|--------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| Latitud | 5° 8' 0,6" N | X=N= | 1057580 | Departamento | CUNDINAMARCA | Corriente | R. CHECUA | Categoría | CP |
| Longitud | 73° 51' 41,1" W | Y=E= | 1023960 | Municipio | NEMOCON | Cuenca | R. CHECUA | Fecha | Instalación 1/04/1953 |
| Elevación | 2580 m.s.n.m | | | Oficina Provincial | 9 SABANA CENTRO | | | Fecha | Suspensión |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1993 | 14 | 15,1 | 15 | 15,3 | 15,3 | 14,3 | 13,7 | 14,4 | 14,5 | 14,2 | 15,5 | 14,6 |
| 1994 | 14,6 | 15,4 | 16,3 | 16,3 | 16,3 | 15,6 | 14,9 | 15,2 | 16 | 15,1 | 14,4 | 14 |
| 1995 | 14,2 | 15,3 | 15,1 | 15,7 | 13,9 | 14,3 | 13,6 | 14,4 | 13,9 | 14,2 | 15,4 | 14,7 |
| 1996 | 14,5 | 13,7 | 14,6 | 16,3 | 16,4 | 16 | 16 | 15,2 | 14,9 | 13,5 | 13,5 | 12,7 |
| 1997 | 13,7 | 13,4 | 14,4 | 13,9 | 13,5 | 13,3 | 12,4 | 12,7 | 13,9 | 14,5 | 14,5 | 15 |
| 1998 | 15,2 | 16,4 | 16 | 16,6 | 15,6 | 14,3 | 14,1 | 14,7 | 15,1 | 15,2 | 15,7 | 15,4 |
| 1999 | | 14,7 | 14,6 | 12,8 | 13 | 12,9 | 11,7 | 12,1 | 12,2 | 12,6 | 13 | 13,1 |
| 2000 | 12,3 | 13,1 | 14,1 | 13,6 | 13,6 | 13,5 | 12,4 | 12,3 | 13,5 | 13,6 | 14 | 14,2 |
| 2001 | 13,3 | 13,7 | 15,1 | 14,2 | 14,9 | 13,5 | 13,1 | 12,9 | 14 | 14,1 | 14 | 14,7 |
| 2002 | 13,8 | 16 | 16,7 | 15,8 | 16 | 15 | 15,2 | 14,5 | 14,6 | 15,4 | 14,7 | 13,7 |
| 2003 | 13,9 | 13,3 | 14 | 13,9 | 14,1 | 14,1 | 14,2 | 13,8 | 14,2 | 14,8 | 15 | 13,2 |
| 2004 | 12,6 | 11,9 | 12,7 | 13,4 | 13,2 | 12,1 | 11,6 | 12,9 | 12,8 | 13,6 | 13,7 | 13,5 |
| 2005 | 13,6 | 14,6 | 15 | 14,5 | 14,5 | 13,4 | 14,2 | 14,6 | 13,3 | 14,1 | 14,9 | 14,2 |
| 2006 | 14,6 | 12,4 | 12,7 | 14,1 | 13,4 | 13,4 | 13,3 | 14 | 14 | 14,6 | 14,5 | 14,6 |
| 2007 | 14 | 13,4 | 14,1 | 13,5 | | | 12,8 | 12,4 | 12,4 | 13,4 | 12,6 | 13,4 |
| 2008 | 13,9 | 14,6 | 14,6 | 15,1 | 15 | 14,3 | 14 | 14 | 12,5 | 12,5 | 12,8 | 12,7 |
| 2009 | 13,2 | 15,3 | 15,5 | 15,8 | 15,1 | 14,8 | 14,5 | 15 | 15 | 15,7 | 15,8 | 14,8 |
| 2010 | 15,4 | 17,5 | 16,8 | 17,4 | 17,2 | 15,8 | 15,6 | 14 | 14,1 | 14,9 | 15,5 | 14,8 |
| 2011 | 14,3 | 14,1 | 13,8 | 13,8 | 13,5 | 15 | 12,9 | 12,1 | 12,3 | 13,1 | 13,6 | 13,8 |
| 2012 | 13,9 | 14 | 13,1 | 13 | 12,9 | 12,2 | 11,9 | 12,7 | 11,9 | 12,9 | 13,4 | 12,8 |
| 2013 | 13,7 | 14,3 | 14,6 | 14,7 | 14,7 | 14,2 | 13,2 | 13,6 | 14,3 | 14,1 | 13,9 | 13,5 |
| 2014 | 14,2 | 14,7 | 14,7 | 14,5 | 14 | 14,4 | 13,9 | 13,4 | 14,2 | 14,3 | 14,2 | 12,6 |
| 2015 | 12,2 | 11,6 | 13,4 | 14,7 | 15,2 | 14,1 | 14,6 | 14,2 | 11,9 | 12,9 | 15,3 | 13,7 |
| 2016 | 16,1 | 16,3 | 16,2 | 15,7 | 14,9 | 13,5 | 13,3 | 13,2 | 13,5 | 14,9 | 14,4 | 13,8 |
| 2017 | 13,8 | 14,2 | 13,9 | 14,2 | 13,6 | 13,9 | 13,3 | 13,4 | 13,9 | 14 | 14,6 | 14,3 |
| 2018 | 14,1 | 14,8 | 14,4 | 14,1 | 14,4 | 13,7 | 14 | 13,2 | 14 | 14,8 | 15 | 14 |

Anexo E - INFORMACIÓN DESCARGADA DEL SENSOR GIOVANNI

SERIE DE TIEMPO PROMEDIO DE ÁREA DE LA TASA DE PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)

| | |
|--|---|
| Title | "Time Series, Area-Averaged of Precipitation Rate monthly 0.25 deg. [TRMM ()]" |
| User Start Date | 1998-01-01T00:00:00Z |
| User End Date | 2019-12-31T23:59:59Z |
| User Bounding Box | "-73.56,5.13,-73.47,5.4" |
| Data Bounding Box: | "-73.625,5.375,-73.625,5.375" |
| URL to Reproduce Results: | https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=TRMM_3B43_7_precipitation(units%3Dmm%2Fmonth)&portal=GIOVANNI&format=json |
| Fill Value (mean_TRMM_3B43_7_precipitation) | -9999.9 |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1998 | 21,91 | 52,80 | 116,19 | 179,55 | 231,26 | 145,16 | 171,11 | 119,99 | 123,59 | 160,11 | 135,08 | 113,09 |
| 1999 | 85,17 | 147,13 | 110,10 | 160,33 | 105,83 | 151,90 | 85,48 | 91,84 | 165,53 | 180,35 | 103,74 | 108,77 |
| 2000 | 44,68 | 95,74 | 130,65 | 130,33 | 170,97 | 140,15 | 134,67 | 115,39 | 164,61 | 157,44 | 108,93 | 58,01 |
| 2001 | 27,43 | 44,74 | 120,49 | 75,32 | 145,72 | 109,68 | 87,34 | 76,38 | 155,42 | 123,76 | 121,11 | 95,64 |
| 2002 | 16,81 | 52,26 | 41,89 | 191,20 | 179,39 | 132,04 | 95,59 | 108,86 | 104,13 | 109,49 | 94,53 | 67,91 |
| 2003 | 10,57 | 52,09 | 98,60 | 158,54 | 137,57 | 129,99 | 92,26 | 122,33 | 113,94 | 171,78 | 176,94 | 71,47 |
| 2004 | 27,96 | 44,23 | 83,59 | 201,56 | 248,77 | 118,39 | 121,08 | 93,87 | 118,55 | 183,46 | 144,42 | 68,34 |
| 2005 | 55,67 | 72,87 | 67,29 | 148,79 | 177,13 | 96,90 | 85,91 | 103,51 | 115,62 | 194,71 | 144,74 | 70,10 |
| 2006 | 106,56 | 49,26 | 161,03 | 235,23 | 166,18 | 178,22 | 95,85 | 77,67 | 89,34 | 177,40 | 182,18 | 105,16 |
| 2007 | 34,12 | 33,22 | 129,14 | 169,63 | 154,25 | 114,39 | 79,63 | 134,94 | 78,64 | 227,04 | 132,29 | 128,58 |
| 2008 | 71,09 | 64,78 | 105,08 | 146,03 | 215,83 | 151,68 | 130,91 | 135,54 | 103,53 | 166,40 | 218,65 | 68,91 |
| 2009 | 76,06 | 57,62 | 124,77 | 105,72 | 87,60 | 103,42 | 76,85 | 63,28 | 35,69 | 157,82 | 61,72 | 34,72 |

| | |
|--|---|
| Title | "Time Series, Area-Averaged of Precipitation Rate monthly 0.25 deg. [TRMM ()]" |
| User Start Date | 1998-01-01T00:00:00Z |
| User End Date | 2019-12-31T23:59:59Z |
| User Bounding Box | "-73.56,5.13,-73.47,5.4" |
| Data Bounding Box: | "-73.625,5.375,-73.625,5.375" |
| URL to Reproduce Results: | https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=-73.56,5.13,-73.47,5.4&data=TRMM_3B43_7_precipitation(units%3Dmm%2Fmonth)&portal=GIOVANNI&format=json |
| Fill Value (mean_TRMM_3B43_7_precipitation) | -9999.9 |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2010 | 4,28 | 32,94 | 60,38 | 176,97 | 196,00 | 140,60 | 194,55 | 104,12 | 91,44 | 194,20 | 180,97 | 151,15 |
| 2011 | 47,49 | 98,14 | 121,60 | 228,62 | 186,87 | 104,72 | 142,92 | 77,54 | 105,15 | 151,39 | 233,51 | 110,24 |
| 2012 | 88,92 | 46,25 | 75,30 | 219,30 | 66,27 | 55,42 | 89,44 | 45,33 | 23,93 | 130,12 | 66,16 | 67,53 |
| 2013 | 32,00 | 103,45 | 62,72 | 139,09 | 133,94 | 92,37 | 68,77 | 93,24 | 53,77 | 65,50 | 112,18 | 62,10 |
| 2014 | 41,95 | 108,96 | 89,06 | 95,42 | 89,16 | 57,55 | 59,96 | 57,65 | 45,31 | 94,96 | 145,12 | 76,90 |
| 2015 | 68,33 | 33,81 | 106,44 | 83,93 | 38,55 | 46,60 | 67,35 | 40,50 | 65,03 | 66,56 | 99,94 | 17,27 |
| 2016 | 46,55 | 34,29 | 166,78 | 224,35 | 146,20 | 64,12 | 101,78 | 93,16 | 85,28 | 122,56 | 171,03 | 96,02 |
| 2017 | 72,37 | 90,52 | 215,59 | 120,45 | 194,31 | 118,55 | 55,77 | 83,69 | 80,66 | 103,91 | 143,55 | 73,30 |
| 2018 | 56,01 | 33,90 | 126,22 | 170,76 | 175,12 | 80,69 | 92,36 | 77,70 | 69,09 | 175,61 | 127,59 | 20,50 |

**SERIE DE TIEMPO ÁREA PROMEDIO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE
SUPERFICIAL MENSUAL (°C)**

| | |
|--|---|
| Title | "Time Series, Area-Averaged of Surface air temperature monthly 0.5 x 0.625 deg. [MERRA-2 ()]" |
| User Start Date | 1998-01-01T00:00:00Z |
| User End Date | 2019-12-31T23:59:59Z |
| User Bounding Box | "-73.56,5.13,-73.47,5.4" |
| Data Bounding Box: | "-73.75,5.5,-73.75,5.5" |
| URL to Reproduce Results: | https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=- |
| Fill Value (mean_TRMM_3B43_7_precipitation) | 1000000000000000 |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1998 | 15,85 | 16,33 | 16,58 | 16,43 | 15,62 | 14,62 | 14,37 | 14,57 | 14,65 | 14,67 | 14,63 | 14,41 |
| 1999 | 14,45 | 14,36 | 14,70 | 14,65 | 14,44 | 14,15 | 13,82 | 13,64 | 13,86 | 13,92 | 14,24 | 14,43 |
| 2000 | 13,82 | 14,12 | 14,58 | 14,86 | 14,64 | 14,22 | 13,66 | 14,05 | 14,07 | 14,31 | 14,22 | 14,58 |
| 2001 | 14,19 | 14,30 | 15,14 | 15,39 | 15,05 | 14,46 | 14,24 | 14,71 | 14,61 | 14,99 | 14,80 | 15,34 |
| 2002 | 15,30 | 15,85 | 15,87 | 15,15 | 15,20 | 14,34 | 14,38 | 14,51 | 14,98 | 14,85 | 14,89 | 15,40 |
| 2003 | 15,94 | 16,14 | 15,73 | 15,45 | 15,26 | 14,30 | 14,64 | 14,55 | 14,79 | 15,01 | 15,08 | 14,91 |
| 2004 | 14,82 | 15,14 | 16,12 | 15,53 | 15,01 | 14,20 | 13,93 | 14,26 | 14,43 | 14,91 | 14,85 | 14,99 |
| 2005 | 15,08 | 15,87 | 16,41 | 16,07 | 15,27 | 14,84 | 14,56 | 14,89 | 15,45 | 14,87 | 14,70 | 14,78 |
| 2006 | 14,96 | 15,84 | 15,51 | 15,33 | 14,95 | 14,31 | 14,52 | 15,01 | 15,17 | 15,15 | 14,94 | 15,17 |
| 2007 | 15,85 | 15,77 | 15,78 | 15,67 | 15,29 | 14,36 | 14,57 | 14,42 | 14,54 | 14,46 | 14,92 | 14,60 |
| 2008 | 15,14 | 15,36 | 15,17 | 15,48 | 15,31 | 15,39 | 14,76 | 15,03 | 15,37 | 15,08 | 14,82 | 14,82 |
| 2009 | 15,09 | 15,09 | 15,18 | 15,46 | 15,19 | 14,75 | 14,80 | 15,13 | 15,48 | 15,21 | 15,37 | 15,59 |
| 2010 | 15,69 | 17,05 | 16,74 | 15,96 | 15,64 | 14,82 | 14,54 | 14,23 | 14,33 | 14,45 | 14,24 | 14,23 |
| 2011 | 14,64 | 14,48 | 14,38 | 14,79 | 14,75 | 14,67 | 14,21 | 14,39 | 14,37 | 14,03 | 1,44 | 14,75 |
| 2012 | 14,62 | 14,61 | 14,84 | 14,67 | 14,69 | 14,37 | 14,30 | 14,30 | 14,33 | 14,64 | 15,27 | 14,84 |
| 2013 | 15,22 | 15,13 | 15,75 | 15,75 | 15,12 | 14,73 | 14,29 | 14,32 | 14,65 | 14,87 | 14,56 | 14,97 |

| | |
|--|---|
| Title | "Time Series, Area-Averaged of Surface air temperature monthly 0.5 x 0.625 deg. [MERRA-2 ()]" |
| User Start Date | 1998-01-01T00:00:00Z |
| User End Date | 2019-12-31T23:59:59Z |
| User Bounding Box | "-73.56,5.13,-73.47,5.4" |
| Data Bounding Box: | "-73.75,5.5,-73.75,5.5" |
| URL to Reproduce Results: | https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2019-12-31T23:59:59Z&bbox=- |
| Fill Value (mean_TRMM_3B43_7_precipitation) | 1000000000000000 |

| AÑO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2014 | 15,10 | 15,18 | 15,37 | 15,61 | 15,46 | 14,86 | 14,64 | 14,43 | 14,91 | 14,71 | 14,99 | 15,03 |
| 2015 | 14,60 | 15,24 | 15,46 | 15,58 | 15,52 | 14,81 | 14,75 | 15,12 | 15,34 | 15,31 | 15,15 | 15,44 |
| 2016 | 16,05 | 16,60 | 17,05 | 16,12 | 15,62 | 14,59 | 14,43 | 14,65 | 14,80 | 15,11 | 14,92 | 14,92 |
| 2017 | 14,51 | 14,83 | 14,98 | 15,52 | 15,25 | 14,95 | 14,44 | 14,93 | 14,99 | 14,86 | 15,12 | 14,91 |
| 2018 | 14,69 | 14,81 | 1,53 | 14,79 | 14,90 | 14,41 | 14,40 | 13,96 | 14,56 | 14,79 | 15,34 | 14,80 |

Anexo F –CALUCLOS BALANCES HÍDRICOS CLIMATICO – BHC

Estaciones Meteorológicas: Periodo común 30 años (1988 – 2018)

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL - ETP

| | | | | | |
|-----------------|------------------|----------|----------|----------|---------------|
| ESTACIÓN | 2120540 - CHECUA | G | M | S | Lat. N |
| Latitud | 5° 7' 0,6" N | 5 | 7 | 6 | 5,11833333 |
| Longitud | 73° 51' 41,1" W | 73 | 51 | 41,1 | |

| EVOTRANSPIRACIÓN - Método de Thornthwaite | | | | | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------|--------------------|---------------------|---------------------------|-----------------|
| TEMPERATURAS MEDIAS 1988 -2019 | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL | (i) INDICE DE CALOR MENSUAL | $ETP_{(sin\ corregir)}$ | (N) | $f = \frac{N}{12}$ | No. DÍAS DEL MES | n° DÍAS DEL MES (d/30) | ETP (mm/mes) |
| ENERO | 13,93 | 4,72 | 54,87 | 12,30 | 1,03 | 31 | 1,03 | 58,11 |
| FEBRERO | 14,37 | 4,94 | 57,32 | 12,30 | 1,03 | 28 | 0,93 | 54,84 |
| MARZO | 14,64 | 5,08 | 58,82 | 12,10 | 1,01 | 31 | 1,03 | 61,29 |
| ABRIL | 14,72 | 5,13 | 59,28 | 12,00 | 1,00 | 30 | 1,00 | 59,28 |

| EVOTRANSPIRACIÓN - Método de Thornthwaite | | | | | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------|--------------------|---------------------|---------------------------|-----------------|
| TEMPERATURAS MEDIAS 1988 -2019 | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL | (i) INDICE DE CALOR MENSUAL | $ETP_{(sin\ corregir)}$ | (N) | $f = \frac{N}{12}$ | No. DÍAS DEL MES | n° DÍAS DEL MES (d/30) | ETP (mm/mes) |
| MAYO | 14,52 | 5,02 | 58,19 | 11,90 | 0,99 | 31 | 1,03 | 59,62 |
| JUNIO | 14,01 | 4,76 | 55,33 | 11,80 | 0,98 | 30 | 1,00 | 54,41 |
| JULIO | 13,57 | 4,54 | 52,94 | 11,80 | 0,98 | 31 | 1,03 | 53,79 |
| AGOSTO | 13,60 | 4,55 | 53,09 | 11,90 | 0,99 | 30 | 1,00 | 52,65 |
| SEPTIEMBRE | 13,71 | 4,60 | 53,66 | 12,00 | 1,00 | 31 | 1,03 | 55,45 |
| OCTUBRE | 14,05 | 4,78 | 55,56 | 12,20 | 1,02 | 31 | 1,03 | 58,37 |
| NOVIEMBRE | 14,32 | 4,92 | 57,07 | 12,30 | 1,03 | 30 | 1,00 | 58,49 |
| DICIEMBRE | 13,93 | 4,72 | 54,90 | 12,40 | 1,03 | 31 | 1,03 | 58,62 |
| (i) INDICE DE CALOR MENSUAL | | 57,76 | $\alpha = 1,40$ | | | ETP: ANUAL | | 684,92 |

BALANCE HÍDRICO CLIMATICO (BHC) - METODO DIRECTO

Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo : 50 mm

| PARAMETRO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE | TOTAL |
|-------------------------------------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-----------|--------|--------|
| PRECIPITACIÓN | 23,82 | 34,95 | 68,97 | 80,15 | 75,72 | 49,66 | 52,80 | 46,45 | 44,86 | 77,50 | 74,78 | 37,93 | 667,59 |
| ETP | 58,11 | 54,84 | 61,29 | 59,28 | 59,62 | 54,41 | 53,79 | 52,65 | 55,45 | 58,37 | 58,49 | 58,62 | 684,92 |
| Δ (P-ETP) | -34,29 | -19,88 | 7,68 | 20,87 | 16,10 | -4,75 | -0,99 | -6,21 | -10,59 | 19,13 | 16,28 | -20,69 | |
| ALMACENAMIENTO | 0,00 | 0,00 | 7,68 | 28,56 | 44,65 | 39,91 | 38,92 | 32,71 | 22,12 | 41,25 | 50,00 | 29,31 | |
| PERCOLACIÓN | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 7,54 | 0,00 | 7,54 |
| UTILIZACIÓN ALMACENAMIENTO (exceso) | -29,31 | 0,00 | 7,68 | 20,87 | 16,10 | -4,75 | -0,99 | -6,21 | -10,59 | 19,13 | 8,75 | -20,69 | 0,00 |
| DÉFICIT | -4,98 | -19,88 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 24,86 |
| ETR (mm) | 53,13 | 34,95 | 61,29 | 59,28 | 59,62 | 54,41 | 53,79 | 52,65 | 55,45 | 58,37 | 58,49 | 58,62 | 660,06 |
| | DEFICIT | DEFICIT | | | | | | | | | SUPERAVIT | | |

| | | | | | |
|--|--|-----------------|-----------|--------------------|---------|
| CIERRE DEL BALANCE | Entradas = Salidas Precipitación = Percolación + ETR | Entrada: | 667,59 mm | Diferencia: | 0,00 mm |
| | | Salidas | 667,59 mm | | |
| PORCENTAJE DE RECARGA AL ACUÍFERO | $\% \text{ Recarga} = \frac{\text{Percolación}}{\text{Precipitación}}$ | | 1,13% | | |
| Mes de inicio Balance P > ETP | | | | | |

Estaciones Meteorológicas: Periodo común 20 años (1998 – 2018)

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL - ETP

| | | | | | |
|-----------------|------------------|----------|----------|----------|---------------|
| ESTACIÓN | 2120540 - CHECUA | G | M | S | Lat. N |
| Latitud | 5° 7' 0,6" N | 5 | 7 | 6 | 5,11833333 |
| Longitud | 73° 51' 41,1" W | 73 | 51 | 41,1 | |

| EVOTRANSPIRACIÓN - Método de Thornthwaite | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|---|------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| TEMPERATURAS MEDIAS 1988 -2019 | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL | (i) INDICE DE CALOR MENSUAL | $ETP_{(sin\ corregir)}$ | (N) | $f = \frac{N}{12}$ | No. DÍAS DEL MES | n° DÍAS DEL MES (d/30) | ETP (mm/mes) |
| ENERO | 13,90 | 4,70 | 55,03 | 12,30 | 1,03 | 31 | 1,03 | 58,29 |
| FEBRERO | 14,33 | 4,92 | 57,38 | 12,30 | 1,03 | 28 | 0,93 | 54,89 |
| MARZO | 14,57 | 5,05 | 58,74 | 12,10 | 1,01 | 31 | 1,03 | 61,20 |
| ABRIL | 14,54 | 5,04 | 58,58 | 12,00 | 1,00 | 30 | 1,00 | 58,58 |
| MAYO | 14,43 | 4,98 | 57,96 | 11,90 | 0,99 | 31 | 1,03 | 59,40 |
| JUNIO | 13,90 | 4,70 | 55,00 | 11,80 | 0,98 | 30 | 1,00 | 54,09 |

| EVOTRANSPIRACIÓN - Método de Thornthwaite | | | | | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------|--------------------|---------------------|---------------------------|-----------------|
| TEMPERATURAS MEDIAS 1988 -2019 | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL | (i) INDICE DE CALOR MENSUAL | $ETP_{(sin\ corregir)}$ | (N) | $f = \frac{N}{12}$ | No. DÍAS DEL MES | n° DÍAS DEL MES (d/30) | ETP (mm/mes) |
| JULIO | 13,51 | 4,51 | 52,89 | 11,80 | 0,98 | 31 | 1,03 | 53,74 |
| AGOSTO | 13,48 | 4,49 | 52,68 | 11,90 | 0,99 | 30 | 1,00 | 52,24 |
| SEPTIEMBRE | 13,51 | 4,50 | 52,86 | 12,00 | 1,00 | 31 | 1,03 | 54,63 |
| OCTUBRE | 14,07 | 4,79 | 55,95 | 12,20 | 1,02 | 31 | 1,03 | 58,78 |
| NOVIEMBRE | 14,31 | 4,92 | 57,30 | 12,30 | 1,03 | 30 | 1,00 | 58,73 |
| DICIEMBRE | 13,85 | 4,68 | 54,71 | 12,40 | 1,03 | 31 | 1,03 | 58,42 |
| (i) INDICE DE CALOR MENSUAL | | 57,27 | $a = 1,39$ | | | ETP: ANUAL | | 682,98 |

BALANCE HÍDRICO CLIMATICO (BHC) - METODO DIRECTO

Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo : 50 mm

| PARAMETRO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE | TOTAL |
|-------------------------------------|---------|---------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|--------|
| PRECIPITACIÓN | 23,92 | 36,01 | 69,48 | 89,11 | 78,94 | 54,13 | 50,11 | 44,49 | 45,28 | 78,99 | 72,54 | 34,40 | 677,39 |
| ETP | 58,29 | 54,89 | 61,20 | 58,58 | 59,40 | 54,09 | 53,74 | 52,24 | 54,63 | 58,78 | 58,73 | 58,42 | 682,98 |
| Δ (P-ETP) | -34,37 | -18,88 | 8,28 | 30,53 | 19,55 | 0,05 | -3,63 | -7,76 | -9,35 | 20,21 | 13,81 | -24,03 | |
| ALMACENAMIENTO | 0,00 | 0,00 | 8,28 | 38,81 | 50,00 | 50,00 | 46,37 | 38,61 | 29,26 | 49,47 | 50,00 | 25,97 | |
| PERCOLACIÓN | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 8,35 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 13,28 | 0,00 | 21,68 |
| UTILIZACIÓN ALMACENAMIENTO (exceso) | -25,97 | 0,00 | 8,28 | 30,53 | 11,19 | 0,00 | -3,63 | -7,76 | -9,35 | 20,21 | 0,53 | -24,03 | 0,00 |
| DÉFICIT | -8,40 | -18,88 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 27,28 |
| ETR (mm) | 49,89 | 36,01 | 61,20 | 58,58 | 59,40 | 54,09 | 53,74 | 52,24 | 54,63 | 58,78 | 58,73 | 58,43 | 655,70 |
| | DEFICIT | DEFICIT | | | SUPERAVIT | SUPERAVIT | | | | | SUPERAVIT | | |

| | | | | | |
|--|--|-----------------|-----------|--------------------|---------|
| CIERRE DEL BALANCE | Entradas = Salidas Precipitación = Percolación + ETR | Entrada: | 677,39 mm | Diferencia: | 0,00 mm |
| | | Salidas | 677,39 mm | | |
| PORCENTAJE DE RECARGA AL ACUÍFERO | $\% \text{ Recarga} = \frac{\text{Percolación}}{\text{Precipitación}}$ | | 3,20% | | |
| Mes de inicio Balance P > ETP | | | | | |

Teledetección: Periodo común 20 años (1998 – 2018)

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL - ETP

| | | | | | |
|-----------------|------------------|----------|----------|----------|---------------|
| ESTACIÓN | 2120540 - CHECUA | G | M | S | Lat. N |
| Latitud | 5° 7' 0,6" N | 5 | 7 | 6 | 5,11833333 |
| Longitud | 73° 51' 41,1" W | 73 | 51 | 41,1 | |

| EVOTRANSPIRACIÓN - Método de Thornthwaite | | | | | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------|--------------------|---------------------|---------------------------|-----------------|
| TEMPERATURAS MEDIAS 1988 -2019 | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL | (i) INDICE DE CALOR MENSUAL | $ETP_{(sin\ corregir)}$ | (N) | $f = \frac{N}{12}$ | No. DÍAS DEL MES | n° DÍAS DEL MES (d/30) | ETP (mm/mes) |
| ENERO | 15,03 | 5,29 | 58,55 | 12,30 | 1,03 | 31 | 1,03 | 62,01 |
| FEBRERO | 15,34 | 5,46 | 60,33 | 12,30 | 1,03 | 28 | 0,93 | 57,71 |
| MARZO | 14,90 | 5,22 | 57,81 | 12,10 | 1,01 | 31 | 1,03 | 60,23 |
| ABRIL | 15,44 | 5,51 | 60,93 | 12,00 | 1,00 | 30 | 1,00 | 60,93 |
| MAYO | 15,15 | 5,36 | 59,25 | 11,90 | 0,99 | 31 | 1,03 | 60,72 |
| JUNIO | 14,58 | 5,05 | 55,98 | 11,80 | 0,98 | 30 | 1,00 | 55,05 |

| EVOTRANSPIRACIÓN - Método de Thornthwaite | | | | | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------|--------------------|---------------------|---------------------------|-----------------|
| TEMPERATURAS MEDIAS 1988 -2019 | TEMPERATURA MEDIA MENSUAL | (i) INDICE DE CALOR MENSUAL | $ETP_{(sin\ corregir)}$ | (N) | $f = \frac{N}{12}$ | No. DÍAS DEL MES | n° DÍAS DEL MES (d/30) | ETP (mm/mes) |
| JULIO | 14,39 | 4,96 | 54,94 | 11,80 | 0,98 | 31 | 1,03 | 55,82 |
| AGOSTO | 14,53 | 5,03 | 55,71 | 11,90 | 0,99 | 30 | 1,00 | 55,24 |
| SEPTIEMBRE | 14,75 | 5,14 | 56,94 | 12,00 | 1,00 | 31 | 1,03 | 58,83 |
| OCTUBRE | 14,77 | 5,16 | 57,08 | 12,20 | 1,02 | 31 | 1,03 | 59,96 |
| NOVIEMBRE | 14,21 | 4,86 | 53,92 | 12,30 | 1,03 | 30 | 1,00 | 55,27 |
| DICIEMBRE | 14,90 | 5,22 | 57,81 | 12,40 | 1,03 | 31 | 1,03 | 61,73 |
| (i) INDICE DE CALOR MENSUAL | | 62,27 | $a = 1,47$ | | | ETP: ANUAL | | 703,51 |

BALANCE HÍDRICO CLIMATICO (BHC) - METODO DIRECTO

Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo : 50 mm

| PARAMETRO | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE | TOTAL |
|---|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| PRECIPITACIÓN | 49,33 | 64,24 | 110,14 | 160,05 | 154,62 | 111,07 | 101,41 | 91,26 | 94,68 | 148,31 | 138,30 | 79,32 | 1302,73 |
| ETP | 62,01 | 57,71 | 60,23 | 60,93 | 60,72 | 55,05 | 55,82 | 55,24 | 58,83 | 59,96 | 55,27 | 61,73 | 703,51 |
| Δ (P-ETP) | -12,68 | 6,52 | 49,91 | 99,13 | 93,90 | 56,03 | 45,59 | 36,02 | 35,84 | 88,35 | 83,03 | 17,59 | |
| ALMACENAMIENTO | 37,32 | 6,52 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | |
| PERCOLACIÓN | 0,00 | 0,00 | 6,43 | 99,13 | 93,90 | 56,03 | 45,59 | 36,02 | 35,84 | 88,35 | 83,03 | 17,59 | 561,91 |
| UTILIZACIÓN ALMACENAMIENTO (exceso) | -12,68 | 6,52 | 43,48 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 37,32 |
| DÉFICIT | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ETR (mm) | 62,01 | 57,71 | 60,23 | 60,93 | 60,72 | 55,05 | 55,82 | 55,24 | 58,83 | 59,96 | 55,27 | 61,73 | 703,50 |
| | | | SUPERAVIT | |

| | | | | | |
|--|--|-----------------|-----------|--------------------|---------|
| CIERRE DEL BALANCE | Entradas = Salidas Precipitación = Percolación + ETR | Entrada: | 677,39 mm | Diferencia: | 0,00 mm |
| | | Salidas | 677,39 mm | | |
| PORCENTAJE DE RECARGA AL ACUÍFERO | $\% \text{ Recarga} = \frac{\text{Percolación}}{\text{Precipitación}}$ | | 3,20% | | |
| Mes de inicio Balance P > ETP | | | | | |