

# INFORME FINAL EVALUACIÓN REGIONAL DEL AGUA - ERA CORPOCHIVOR

Marzo, 2020

Convenio 003 de 2019

Informe Final Técnico

Autores:

Tania F. Santos

Cristo F. Pérez

Nilo Lima

Luisa Cusguen

Héctor A Angarita

© **INSTITUTO DE AMBIENTE DE ESTOCOLMO**

DAVID PURKEY

Director Ejecutivo Centro Latinoamericano

HÉCTOR ANGARITA

Líder Línea de Investigación Agua

TANIA F. SANTOS, CRISTO F. PÉREZ, NILO LIMA, LUISA CUSGUEN,  
CARLOS E. CÁCERES, HÉCTOR A. ANGARITA.

Equipo técnico e investigadores

**DIRECTIVOS CORPOCHIVOR**

PLINIO ROLANDO FORERO DUEÑAS

Director General.

WILSON PORFIRIO SEGURA CUESTA

Secretario General y Autoridad Ambiental (C)

YANID AVILA ARÉVALO

Subdirectora de Planeación y Ordenamiento Ambiental del Territorio (C)

CLAUDIA CATALINA RODRÍGUEZ LACHE

Subdirectora de Gestión Ambiental.

DIANA LISETH ROA MANRIQUE

Subdirectora Administrativa y Financiera.

MERY JULIETH SUÁREZ MORA

Jefe Oficina de Control Interno.

ANA LILIANA SUÁREZ HERRERA.

Revisora Fiscal.

### **LÍDER DEL PROCESO**

KAREN DAYANA PERILLA NOVOA

Líder Proyecto Gestión Integral del Recurso Hídrico

### **EQUIPO TÉCNICO**

JUANA MARCELA ANDRADE LÓPEZ

Profesional de apoyo Componente de Calidad.

HELMER ERNESTO ROMERO ABRIL

Profesional de apoyo Componente Geológico.

JENNY CAROLINA CARO BERNAL

Profesional de apoyo Componente de Demanda.

ANGIE CAROLINA ARÉVALO VACA

Líder Laboratorio Ambiental Componente de Calidad.

ROBERT NOGUERA QUITIAN

Líder Red Hidroclimática Componente de Oferta.

ANDRÉS FELIPE HERNÁNDEZ LESMES

Profesional de apoyo Componente SIG.

LEIDY MARCELA RODRÍGUEZ GALINDO

Profesional de apoyo

LICETH STEPHANY HOLGUÍN RINTA

Profesional de apoyo

### **CONSEJO DIRECTIVO**

IVÁN DUQUE MÁRQUEZ

PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA de Colombia

ALFONSO SOLER CASTEBLANCO

Representante del presidente de la república

RICARDO JOSÉ LOZANO PICÓN

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

OSCAR FRANCISCO MANTILLA REY

Delegado del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

RAMIRO BARRAGAN ADAME

Gobernador de Boyacá

GIOVANY VIASUS QUINTERO

Delegado del Gobernador de Boyacá.

FIYER ALEXANDER URREGO

Alcalde Municipio Chinavita

NUBIA JACQUELINE CARO PÉREZ

Alcaldesa Municipio Jenesano

RAUL HERNANDO RODRÍGUEZ CHAVARRO

Alcalde Municipio La Capilla

RAFAEL ERNESTO RAMÍREZ VALERO

Alcalde Municipio Úmbita

RAFAEL RUIZ BUITRAGO

Representante del Sector Privado "ASOPROPAPA"

RAFAEL LARA RODRÍGUEZ

Representante del Sector Privado "ARTEFIBRAS"

MARÍA ANDREA MEDINA GARCÍA

Representante ONG "CORPOSUNUBA"

HENRY CUESTA ALFONSO

Representante ONG "AVES"

## Tabla de Contenido

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.      | Introducción.....  | 11 |
| 1.1.    | Generalidades de CORPOCHIVOR.....  | 13 |
| 2.      | Enfoque conceptual .....   | 15 |
| 3.      | Metodología para la implementación de WEAP.....  | 18 |
| 3.1.    | Ciclo del agua .....   | 18 |
| 3.2.    | Descripción de la herramienta WEAP: Sistema de Evaluación y<br>Planeación del Agua .....                       | 20 |
| 3.3.    | Modelo hidrológico .....   | 22 |
| 3.4.    | Delimitación y codificación de unidades hidrográficas.....   | 23 |
| 3.5.    | Reclasificación de Coberturas y Usos del Suelo .....   | 26 |
| 3.6.    | Regionalización de la Climatología Diaria Histórica.....   | 29 |
| 3.7.    | Evaluación de la Demanda de Agua.....  | 30 |
| 3.7.1.  | Demanda estimada a partir de la información y consolidación de datos de<br>usos y usuarios de CORPOCHIVOR..... | 31 |
| 3.7.2.  | Demanda Potencial: estimada por medio de módulos de consumo e<br>información secundaria.....                   | 34 |
| 3.8.    | Calibración del Modelo Hidrológico.....  | 40 |
| 3.9.    | Procedimiento para la Evaluación de los Indicadores Hídricos Regionales<br>en un Modelo basado en WEAP .....   | 45 |
| 3.10.   | Calidad de agua .....  | 48 |
| 3.11.   | Desarrollo de Escenarios Prospectivos .....  | 52 |
| 3.11.1. | Escenarios Climáticos .....  | 52 |
| 3.11.2. | Escenarios de Proyección de la demanda .....   | 56 |
| 4.      | Metodología para la construcción de Indicadores Hídricos Regionales .  | 59 |
| 4.1.    | Indicadores del Sistema Hídrico Natural.....   | 59 |
| 4.1.1.  | Índice de Retención y Regulación Hídrica [IRH].....  | 59 |
| 4.1.2.  | Índice de Aridez [IA].....   | 60 |
| 4.1.3.  | Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Agua<br>Subterránea [IVICAS].....                    | 61 |
| 4.2.    | Indicadores de Presión por Uso del Agua.....   | 63 |
| 4.2.1.  | Índice de Uso de Agua Superficial [IUA].....   | 63 |
| 4.2.2.  | Índice de Uso de Extracción de Agua Subterránea [IEAS].....  | 64 |
| 4.2.3.  | Índice de Agua Subterránea para abastecimiento público con respecto al<br>número de habitantes [IASAP].....    | 65 |
| 4.2.4.  | Índice Integral de Uso de Agua [IIUA].....   | 66 |
| 4.3.    | Indicadores de la Calidad de Agua y Presión por Contaminación .....  | 67 |
| 4.3.1.  | Índice de Calidad del Agua [ICA] .....   | 68 |
| 4.3.2.  | Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua [IACAL] .....   | 75 |
| 4.4.    | Indicadores de Riesgo .....  | 79 |
| 4.4.1.  | Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico [IVH].....  | 79 |
| 4.4.2.  | Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales [IVET].....  | 80 |
| 5.      | Resultados de la Evaluación de Indicadores Hídricos Regionales en<br>CORPOCHIVOR.....                          | 85 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.1.  | Índice de Retención y Regulación Hídrica [IRH] .....   | 85  |
| 5.2.  | Índice de Aridez [IA] .....  | 87  |
| 5.3.  | Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Agua<br>Subterránea [IVICAS].....        | 89  |
| 5.4.  | Índice de Uso del Agua superficial [IUA] .....   | 91  |
| 5.5.  | Índice de Extracción de Agua subterránea [IEAS] .....  | 98  |
| 5.6.  | Índice de Agua subterránea para Abastecimiento Público [IASAP] .....                               | 101 |
| 5.7.  | Índice Integral de Uso de Agua [IIUA] .....  | 103 |
| 5.8.  | Índice de calidad del Agua [ICA] .....   | 105 |
| 5.9.  | Índice de Alteración potencial de la Calidad de Agua [IACAL].....                                  | 108 |
| 5.10. | Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico [IVH].....                                  | 111 |
| 5.11. | Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales [IVET] .....                                       | 117 |
| 5.12. | Visión General del Agua en Corpochivor .....   | 120 |
| 5.13. | Mapas de Calor de la Evaluación de Indicadores Hídricos Regionales<br>Actuales y Proyectados ..... | 121 |
| 6.    | Conclusiones .....   | 124 |
| 7.    | Bibliografía .....   | 128 |

## Lista de Figuras

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 1.  | Ubicación Jurisdicción Corpochivor y cuencas Garagoa, Lengupá,<br>Upía y Guavio. ....   | 14 |
| Figura 2.  | Enfoque conceptual de la evaluación regional del agua en<br>Corpochivor.....  | 16 |
| Figura 3.  | Modelo del Sistema de Indicadores Hídricos.....   | 17 |
| Figura 4.  | Ciclo del agua .....  | 19 |
| Figura 5.  | Diagrama conceptual del método de balance hídrico aproximado ...  | 23 |
| Figura 6.  | Microcuencas definidas en la Jurisdicción.....  | 25 |
| Figura 7.  | Diagrama de flujo para la reclasificación de las categorías de<br>coberturas y usos de suelos en el área de drenaje de las cuatro<br>subzonas hidrográficas que hacen parte de la jurisdicción de<br>Corpochivor..... | 27 |
| Figura 8.  | Coberturas y usos de suelos reclasificados en el área de drenaje de<br>las cuatro subzonas hidrográficas que hacen parte de la jurisdicción<br>de Corpochivor.....  | 28 |
| Figura 9.  | Diagrama del flujo de trabajo para la regionalización del clima<br>histórico diario .....   | 30 |
| Figura 10. | Distribución de usos del agua para concesiones de agua superficial.<br>.....  | 33 |
| Figura 11. | Distribución de usos del agua para concesiones de agua subterránea<br>.....   | 33 |
| Figura 12. | Caudales concesionados por tipo de uso del agua .....   | 34 |
| Figura 13. | Concesiones por tipo de uso del agua.....   | 34 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 14. Distribución porcentual del área sembrada de cultivos permanentes en los municipios de las cuencas del área de estudio.....     | 36  |
| Figura 15. Distribución porcentual del área sembrada de cultivos transitorios en los municipios de las cuencas del área de estudio.....    | 37  |
| Figura 16. Estaciones hidrológicas .....   | 42  |
| Figura 17. Esquema de ubicación de estaciones hidrométricas en la cuenca de estudio .....  | 44  |
| Figura 18. Caudales medios diarios medidos y modelados en la estación Caracol .....  | 44  |
| Figura 19. Diagrama de flujo del procedimiento seguido para evaluar los indicadores hídricos regionales en WEAP.....                       | 47  |
| Figura 20. Muestreos de calidad de agua en tres años de la serie 2001, 2010, 2018.....   | 49  |
| Figura 21. Box Plot ICA IDEAM e ICA CORPOCHIVOR.....   | 52  |
| Figura 22. Metodología para generar series climáticas.....   | 53  |
| Figura 23. Anomalía de precipitación anual proyectada en los dos modelos seleccionados (Superior) cesm1-cam5 (Inferior) ipsl-cm5a-lr ..... | 55  |
| Figura 24. Señal media anual de incremento de la temperatura .....   | 55  |
| Figura 25. Cambios en los atributos periodos climáticos desde 1850 a 2090 para los dos modelos de mejor desempeño .....                    | 56  |
| Figura 26. Tendencia del ICA. ....   | 73  |
| Figura 27. Índice de regulación hídrica [IRH] - año medio.....   | 86  |
| Figura 28. Índice de aridez [IA] – año medio .....   | 88  |
| Figura 29. Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Agua Subterránea [IVICAS] .....                                       | 90  |
| Figura 30. Índice de uso de agua [IUA] - año medio .....   | 94  |
| Figura 31. Índice de uso de agua [IUA] - año seco.....   | 95  |
| Figura 32. Índice de uso de agua [IUA] - escenario demanda potencial con año medio .....   | 96  |
| Figura 33. Índice de uso de agua [IUA] - escenario demanda potencial con año seco .....  | 97  |
| Figura 34. Índice de uso de extracción de agua subterránea [IEAS].....   | 99  |
| Figura 35. Índice de uso de extracción de agua subterránea con demandas potenciales [IEAS] .....   | 100 |
| Figura 36. Índice de Agua subterránea para Abastecimiento Publico [IASAP] .....  | 102 |
| Figura 37. Índice Integral de Uso de Agua [IIUA] .....   | 104 |
| Figura 38. Índice de Calidad de agua IDEAM [ICA].....  | 106 |
| Figura 39. Índice de calidad de agua Corpochivor [ICA] .....   | 107 |
| Figura 40. Índice de alteración de la calidad de agua año medio [IACAL] .....  | 109 |
| Figura 41. Índice de alteración de la calidad de agua año seco [IACAL] .....   | 110 |
| Figura 42. Índice de vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento [IVH]- año medio. ....  | 113 |
| Figura 43. Índice de Desabastecimiento Hídrico [IVH] - Año Seco .....  | 114 |
| Figura 44. Índice de Desabastecimiento Hídrico [IVH] - escenario demanda potencial con año medio.....                                      | 115 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 45. Índice de Desabastecimiento Hídrico [IVH] - escenario demanda potencial con año seco .....   | 116 |
| Figura 46. Esquema de la evaluación de parámetros morfométricos en el área bajo jurisdicción de Corpochivor .....   | 118 |
| Figura 47. Curva de duración de caudal para algunas microcuencas en el área de jurisdicción de Corpochivor. ....  | 118 |
| Figura 48. Índice de Vulnerabilidad a eventos torrenciales. ....  | 119 |
| Figura 49. Diagrama de coordenadas paralelas de los indicadores hídricos regionales en Corpochivor .....  | 121 |
| Figura 50. Heatmaps de la evaluación de indicadores hidricos regionales en condiciones actuales [1980-2018] versus dos Modelos de Circulación Globales [2018-2040]..... | 123 |

## Lista de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Indicadores para la Evaluación Regional del Agua en CORPOCHIVOR .....   | 15 |
| Tabla 2. Módulos de riego ponderados por área sembrada, para cultivos permanentes y transitorios.....  | 38 |
| Tabla 3. Métricas de desempeño del modelo hidrológico en diferentes puntos de medición de caudales .....   | 45 |
| Tabla 4. Parámetros de calidad de agua monitoreados .....  | 50 |
| Tabla 5. Sesgo relativo (PR) de los diferentes GCM según los criterios de desempeño en la Jurisdicción de Corpochivor. ....                              | 54 |
| Tabla 6. Tasa de crecimiento o decrecimiento de la población municipal urbana y rural presente en las cuencas objeto de estudio. ....                    | 57 |
| Tabla 7. Categorías para la evaluación del IRH .....   | 60 |
| Tabla 8. Categorías para la evaluación del IA .....  | 61 |
| Tabla 9. Categorías de vulnerabilidad para el método GOD .....   | 63 |
| Tabla 10. Categorías para la evaluación del IUA .....  | 64 |
| Tabla 11. Categorías para la evaluación del IEAS .....   | 65 |
| Tabla 12. Categorías para la evaluación del IASAP .....  | 66 |
| Tabla 13. Categorías para la evaluación del IIUA .....   | 66 |
| Tabla 14. Parámetros de calidad de agua incluidos en el ICA y su función de transformación .....   | 69 |
| Tabla 15. Categorías para la evaluación del ICA .....  | 70 |
| Tabla 16. Funciones de transformación de parámetros de calidad de agua de acuerdo con rangos para la determinación del ICA. Metodología Corpochivor..... | 71 |
| Tabla 17. Rangos ICA Corpochivor .....   | 72 |
| Tabla 18. Tendencias de calidad de agua en 38 puntos de monitoreo. ....  | 74 |
| Tabla 19. Factores para calcular cargas Aguas Residuales domésticas urbanas y rurales .....  | 76 |
| Tabla 20. Cargas por tipo de cultivo permanente, transitorio y mixto al año. ....  | 77 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 21. Factores de emisión uso pecuario.....  | 78 |
| Tabla 22. Concentraciones de aguas residuales por determinante de calidad de agua para sector minería e industrial. .... | 78 |
| Tabla 23. Reclasificación de carga/caudal para cada determinante de calidad de agua.....                                 | 79 |
| Tabla 24. Clasificación de la alteración potencial de la calidad de agua. IACAL. ....                                    | 79 |
| Tabla 25. Categorías para la evaluación del IVH .....  | 80 |
| Tabla 26. Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET) .....                          | 81 |
| Tabla 27. Relaciones para categorizar el índice morfométrico.....  | 82 |
| Tabla 28. Relaciones entre variables para el índice morfométrico.....  | 83 |
| Tabla 29. Clasificación del índice de variabilidad .....   | 84 |

## Lista de anexos

- A1. Delimitación de cuencas, coberturas y regionalización
- A2. Demandas
- A3. Calibración del modelo WEAP
- A4. Escenarios de cambio climático
- A5. Cartografía y mapas
- A6. Modelo WEAP.

## 1. Introducción

En Colombia, las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible se encargan del manejo del recurso hídrico a partir del conocimiento de su origen, distribución, oferta, demanda y calidad. Este conocimiento permite evaluar su estado actual y realizar proyecciones de posibles escenarios futuros del agua debido a su ocurrencia natural y la interrelación del medio natural y la sociedad. Esta evaluación se denomina Evaluación Regional del Agua ERA y se constituye, por un lado, en una herramienta para conocer el estado actual y las tendencias del agua en una región y por otro lado, en el instrumento para organizar y automatizar la información para el manejo del agua a nivel regional (IDEAM, 2013).

La Evaluación Regional del Agua en Colombia fue definida en el Decreto 1640 de 2012, donde se dio un plazo de tres años (a partir del año 2013, en el que el IDEAM expidió la metodología de la ERA) (IDEAM, 2013) para que las Corporaciones la implementaran.

La ERA no es solamente un instrumento para unificar información regional, sino que permite alimentar la información para la Evaluación Nacional del Agua, liderada por el IDEAM y la Política de Gestión Integral del Recurso Hídrico PGIRH en cabeza del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Para el desarrollo de la ERA, se empleó una herramienta de modelación hidrológica y de planificación de recursos hídricos. Esta herramienta permite

capturar la información disponible en la Corporación en relación con los componentes de Oferta, Demandas, Calidad y Vulnerabilidad, y además simular escenarios de gestión. Los escenarios generados permiten evaluar la respuesta de estas variables y sus indicadores ante la incertidumbre asociada al crecimiento de la población y el cambio climático, en un horizonte de 20 años. La herramienta de modelización hidrológica y de la planificación de recursos hídricos usada es el sistema de la Evaluación y Planeación de Agua WEAP desarrollado por SEI (Yates, Sieber, Pukey, & Huber-Lee, 2005).

En el capítulo dos se explica el enfoque conceptual que orienta la Evaluación regional del agua en Corpochivor. En el capítulo 3 se detallan las metodologías usadas para la implementación del modelo y el cálculo de los indicadores. Con el ánimo de mantener este documento conciso y claro para la comprensión del lector, se decidió realizar en este capítulo una breve descripción de las actividades realizadas. En anexos se detalla la metodología utilizada en cada componente de la implementación del modelo.

La implementación de la ERA en WEAP incluyó innovaciones respecto a anteriores experiencias realizadas por SEI. Estas innovaciones están relacionadas con la regionalización del clima diario y coberturas usando archivos NETcdf, regionalización de escenarios de cambio climático que permiten establecer variabilidad climática exacerbada, automatización para el cálculo de indicadores de la ERA y unidades de análisis a nivel de microcuenca.

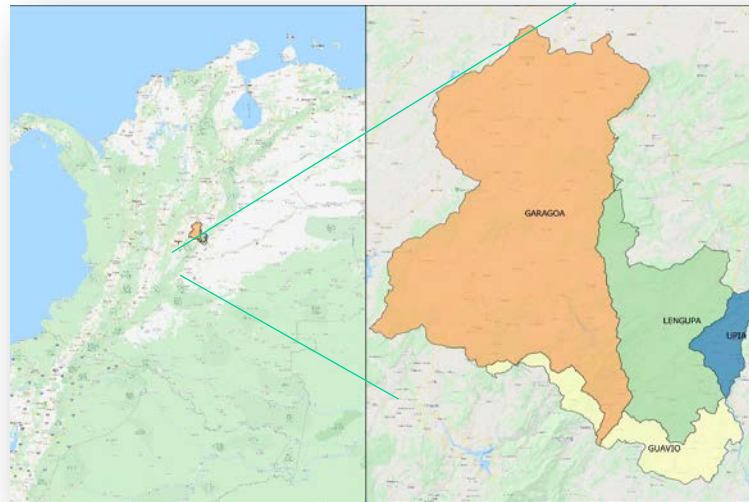
En el capítulo 4 se presentan los indicadores definidos en la ERA calculados en la jurisdicción de Corpochivor. Los resultados de la aplicación de estos cálculos en la Jurisdicción de Corpochivor, donde se analiza el estado actual y prospectivo del recurso hídrico a través de esos indicadores. Cada uno de los indicadores se presenta en mapas desarrollados en ARCGIS y la base de datos y metadatos de estos mapas se adjunta en el Anexo 6. El formato de la base de datos y metadatos sigue los estándares definidos por la Corporación Corpochivor, suministrados por la misma en el convenio de asociación 003 de 2019.

El proyecto contó con un componente de transferencia de capacidades al equipo técnico definido por la Corporación, a través de un proceso de Co-producción del modelo, donde los conocimientos y experticia de los profesionales de la Corpochivor fueron claves para lograr implementar un modelo regional que permitiera representar correctamente la realidad. Para ello se realizaron sesiones presenciales mensuales que pueden consultarse en el Informe Final de actividades, donde se describen las actividades realizadas y cada uno de los talleres llevados a cabo.

### **1.1. Generalidades de CORPOCHIVOR**

La jurisdicción de Corpochivor se encuentra localizada en el piedemonte de la cordillera Oriental de Colombia, entre la región Andina y Orinoquía siendo parte de la Macrocuenca del río Orinoco, Zona hidrográfica del Río Meta, Subzona Hidrográfica del Río Batá. Esta ubicación genera unas condiciones climatológicas particulares que se verán reflejadas en la oferta hídrica y la

vulnerabilidad de la región de estudio (Consortio Río Garagoa, 2016). El estudio se desarrolló en las 4 subcuencas que componen la jurisdicción de Corpochivor: Garagoa, Lengupá, Guavio y Upía (Figura 1).



*Figura 1. Ubicación Jurisdicción Corpochivor y cuencas Garagoa, Lengupá, Upía y Guavio.*

## 2. Enfoque conceptual

En el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral de Recurso hídrico en Colombia se han establecido un conjunto de indicadores que apoyan la toma de decisiones mediante una Evaluación Regional del Agua (ERA). Un indicador es una métrica cuantitativa o cualitativa que permite dar una idea del funcionamiento de los componentes de un sistema a la vez que permite identificar cambios en el tiempo. Estos indicadores reflejan estado de parámetros claves de oferta hídrica, de presión por uso del agua, de estado de la calidad de agua y presión por contaminación y de riesgo relacionando tanto amenazas como vulnerabilidad (Ver Tabla 1).

Tabla 1. *Indicadores para la Evaluación Regional del Agua en CORPOCHIVOR*

| Tipo de Indicador     | Sistema Hídrico Natural   | Intervención Antrópica   |
|-----------------------|---|--|
| <b>Oferta</b>         | Índice de Regulación Hídrica [IRH]  |  |
|                       | Índice de Aridez [IA]   |  |
| <b>Presión</b>        |   | Índice de Uso del Agua superficial [IUA]                       |
|                       |   | Índice de Extracción de Agua subterránea [IEAS]                |
|                       |   | Índice de Agua subterránea para Abastecimiento Público [IASAP] |
|                       |   | Índice Integral de Uso de Agua [IIUA]                          |
| <b>Calidad</b>        |   | Índice de Calidad del Agua [ICA]                               |
|                       |   | Índice de Alteración potencial de la Calidad de Agua [IACAL]   |
| <b>Vulnerabilidad</b> | Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Agua Subterránea [IVICAS] | Índice de Desabastecimiento Hídrico [IVH]                      |
|                       |   | Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales [IVET]         |
|                       |   |  |

Para evaluar el conjunto de indicadores hídricos regionales se desarrolló un modelo que representa sistémicamente procesos hidrológicos y actividades socioeconómicas en el área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Chivor (CORPOCHIVOR). Como se muestra en la Figura 2, nuestro enfoque conceptual y metodológico fue configurado para poder evaluar los indicadores hídricos regionales bajo las condiciones actuales (basado en el clima histórico) considerando tanto las bases de datos de Concesiones de la corporación como la Potencial demanda de agua de acuerdo con la cobertura y uso de suelos actual. Así mismo, el enfoque explora los posibles efectos de escenarios de variabilidad y cambio climático (Modelo de Circulación Global 1 y Modelo de Circulación Global 2) en los mismos indicadores hídricos regionales.

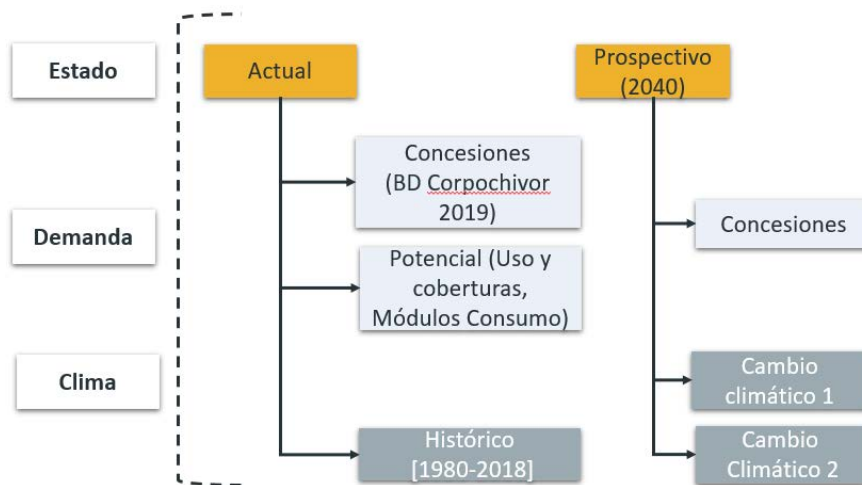


Figura 2. Enfoque conceptual de la evaluación regional del agua en Corpochivor.

Cabe destacar que nuestro enfoque al estar alineado con Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia no solo desarrolla un sistema de indicadores hídricos regionales sino que adicionalmente permite

profundizar más en el conocimiento del sistema hídrico y responder a “*que pasas*” preguntas relacionadas con la situación actual y posibles tendencias en el conjunto de unidades hidrológicas para determinar acciones que sean necesarias para garantizar la sostenibilidad del agua, apoyando a la corporación en la gestión integral del agua (Figura 3).

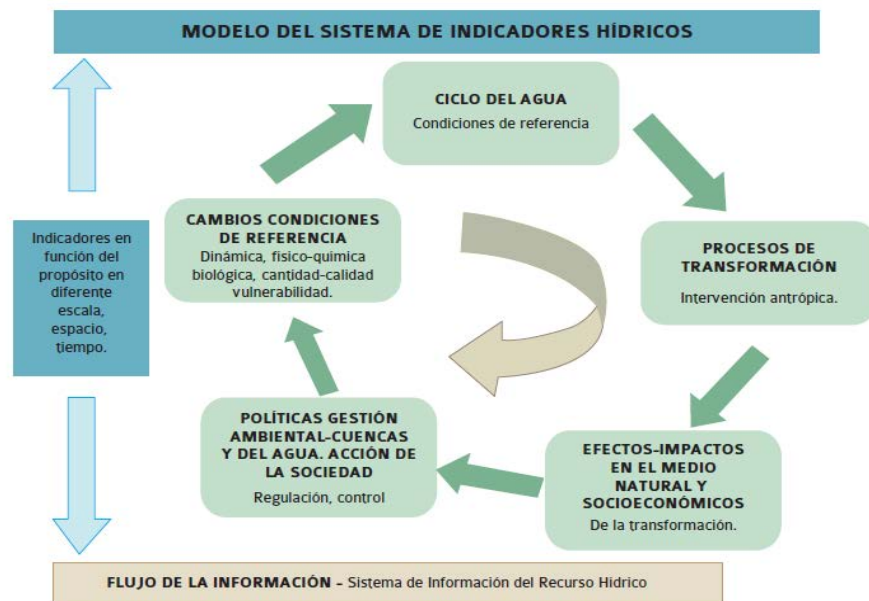


Figura 3. Modelo del Sistema de Indicadores Hídricos

### **3. Metodología para la implementación de WEAP**

La información de los componentes del ciclo hidrológico en la cuenca y los factores antrópicos que afectan el balance hídrico, se organizaron en el sistema para la evaluación y planificación del recurso hídrico, desarrollado por SEI denominado WEAP (Yates, Sieber, Pukey, & Huber-Lee, 2005). Este modelo representa sistémicamente procesos hidrológicos y actividades socioeconómicas en una región, en este caso la jurisdicción de CORPOCHIVOR. En este capítulo se presenta la metodología empleada para la obtención de la información que alimenta el modelo en cada uno de sus componentes.

Para implementar el modelo se realizaron las actividades listadas a continuación, que serán desarrolladas en este capítulo

- Definición de unidades hidrológicas: delimitación de microcuencas
- Definición de coberturas
- Regionalización de la climatología diaria histórica

#### **3.1. Ciclo del agua**

Los sistemas hídricos pueden ser mejor comprendidos a través del análisis de los distintos componentes del ciclo hidrológico. Éste último representa el mecanismo global que hace posible la transferencia de agua desde los océanos

a la superficie y desde las sub/superficie y las plantas a la atmosfera que cubre el planeta tierra. Los principales componentes por un lado son la precipitación, la infiltración, la escorrentía, la evaporación y la transpiración; y por el otro, las actividades socioeconómicas como urbanización, agricultura, ganadería, industria, entre otros. Las complejas interacciones entre ambos tipos de componentes afectan el régimen, la cantidad, la distribución y la calidad del agua en las distintas unidades hidrográficas. En la Figura 4 se observan los componentes del ciclo hidrológico y sus relaciones. En este diagrama se incluye la demanda, debido a que afecta tanto la disponibilidad como la calidad del agua.

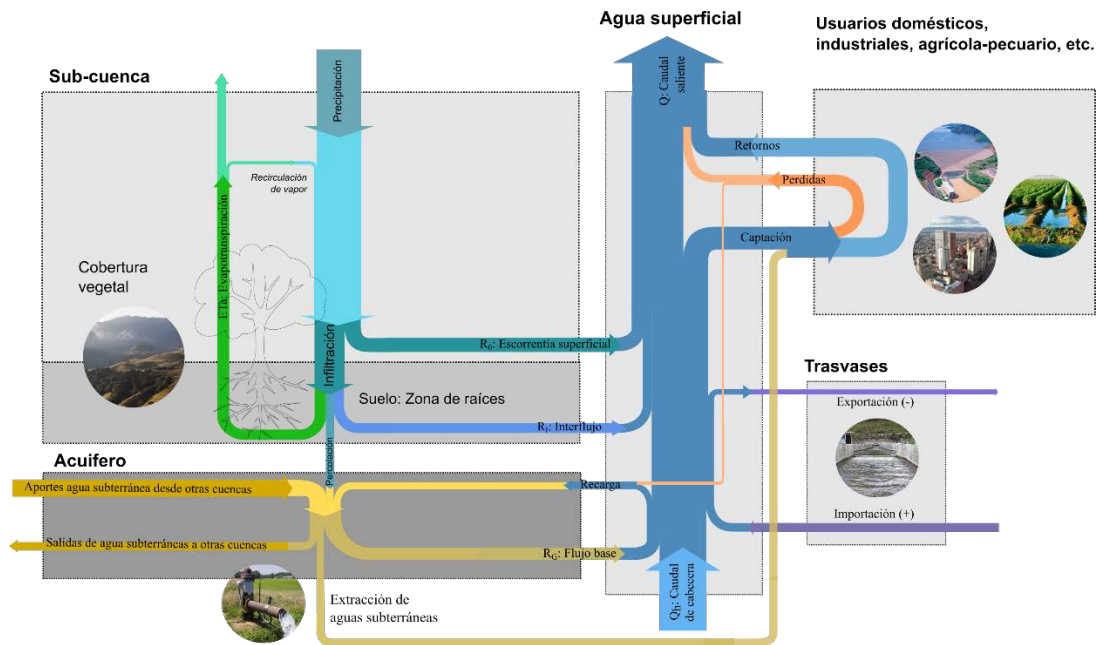


Figura 4. Ciclo del agua

### **3.2. Descripción de la herramienta WEAP: Sistema de Evaluación y Planeación del Agua**

WEAP21 ([www.weap21.org](http://www.weap21.org)) es una plataforma computacional para la modelación integrada de los factores biofísicos y socioeconómicos que determinan la disponibilidad espacial y temporal de agua en una cuenca (Yates, Sieber, Pukey, & Huber-Lee, 2005). Los factores relacionados con el sistema bio-físico, son los que determinan la oferta de agua y su movimiento a través de una cuenca, es decir, el clima, la topografía, cobertura vegetal, la hidrología de aguas superficiales y subterráneas y los suelos. Los factores relacionados con el sistema socio-económico, están asociados principalmente a la demanda de agua y determinan cómo se almacena, asigna y entrega el agua disponible.

Una de las principales ventajas de WEAP en comparación con modelos puramente “hidrológicos” es la posibilidad de incluir la diversidad de componentes de un sistema de recursos hídricos, tales como estructuras *e.g.* regulación, desviación y asignación, y a diferentes tipos de usuarios y demandas *e.g.* domésticos, industriales, agrícolas, hidroenergía, caudales ambientales (Yates, Sieber, Pukey, & Huber-Lee, 2005). Esto permite modelar y analizar cómo configuraciones específicas de infraestructura, reglas de operación y prioridades de asignación de agua a los diferentes usuarios, transforman el régimen hidrológico y los componentes de interés para la

adecuada gestión del recurso hídrico, tales como la oferta hídrica, las demandas, la calidad del agua y la vulnerabilidad, a lo largo de una cuenca.

En WEAP la cuenca es representada como un conjunto de unidades de análisis hidrológico o *catchments*. Los balances hídricos se ejecutan a nivel de cada unidad y posteriormente se integran a través de la red de drenaje. Por lo tanto, es posible establecer los efectos acumulativos de intervenciones ubicadas aguas arriba en cualquier punto de la cuenca.

En WEAP el nivel de detalle espacial y temporal del modelo puede ser ajustado para satisfacer los requisitos de información para la ERA, y además considerar escenarios de planificación ante factores tales como:

- Crecimiento y ubicación de la población en el territorio;
- Cambios en las coberturas vegetales y usos del suelo;
- Escenarios alternativos del clima;
- Crecimiento y localización de actividades económicas hidro-dependientes: navegación, hidro-energía, riego;
- Reglas de funcionamiento de embalses y requisitos de caudales ambientales;
- Cambios en la demanda de acuerdo con la actividad y uso del agua *e.g.* Implementación de técnicas más eficientes de irrigación, reúso del agua, reducción de pérdidas.

### 3.3. Modelo hidrológico

En WEAP, el balance hídrico incluye un modelo hidrológico denominado Método de Humedad del Suelo “Soil Moisture Method”, el cual es un método empírico que involucra dos bloques “buckets” en los que interactúan procesos hidrológicos superficiales y subsuperficiales tales como precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial (interflujos) y percolación profunda dentro de una unidad de drenaje o cuenca. La percolación profunda dentro la unidad de drenaje puede ser transmitida a un cuerpo de agua superficial como flujo base o directamente en almacenamiento de agua subterránea.

En la Figura 5 se puede observar la relación de elementos de WEAP, tales como el nodo que representa la microcuenca (circulo verde-C) conectado a un cuerpo de agua superficial (línea gruesa en color azul) y a un acuífero (cuadrado en color verde-GW) mediante un enlace de escorrentía/infiltración (línea discontinua en color azul). La extracción tanto de agua superficial como de agua subterránea es representada por un enlace de conducción (líneas de color verde claro) hacía un nodo de demanda (circulo en color rojo-D), cuyo flujo de retorno (línea en color rojo) regresa a la fuente de agua superficial. La demanda puede representarse con un nodo de embalse.

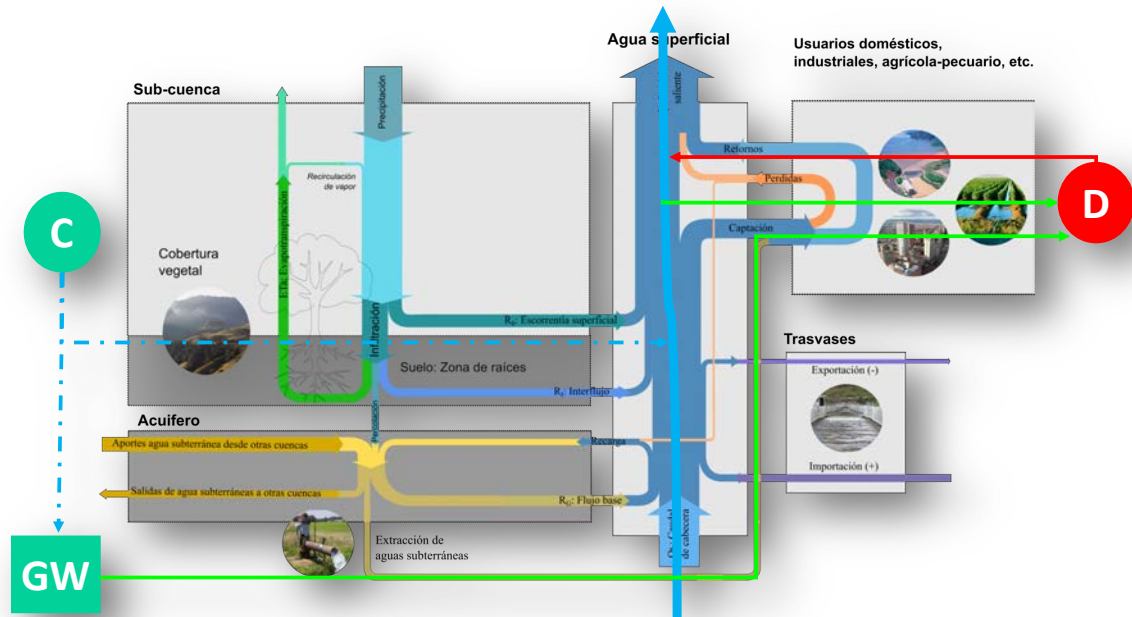


Figura 5. Diagrama conceptual del método de balance hídrico aproximado

### 3.4. Delimitación y codificación de unidades hidrográficas

La definición y codificación de unidades hidrográficas siguió cuatro actividades principales. Inicialmente se definió el área de drenaje que cubre las cuatro (4) subzonas hidrográficas de Guavio, Garagoa, Lengupá y Upía que hacen parte de la jurisdicción de Corpochivor. Posteriormente, se delimitaron redes y unidades hidrográficas siguiendo la metodología descrita por van der Kwast & Menke (2019). Adicionalmente, se empleó cartografía generada por la corporación. Esto permitió generar microcuencas en la zona de interés en formato vector. Luego se importó la capa vector de microcuencas en WEAP y se reprodujeron las mismas unidades hidrográficas en el modo de Delineación Automática. Por su parte, la codificación de las microcuencas siguió una

variación a la metodología de Otto Pfafstetter modificada por el Instituto de Estudios Ambientales (IDEAM) para unidades hidro(geo)lógicas en Colombia (IDEAM, 2013). La Figura 6 muestra las 204 microcuencas delineadas y codificadas en el área de jurisdicción de Corpochivor. Mayor detalle de la metodología anteriormente descrita puede ser encontrada en el Anexo

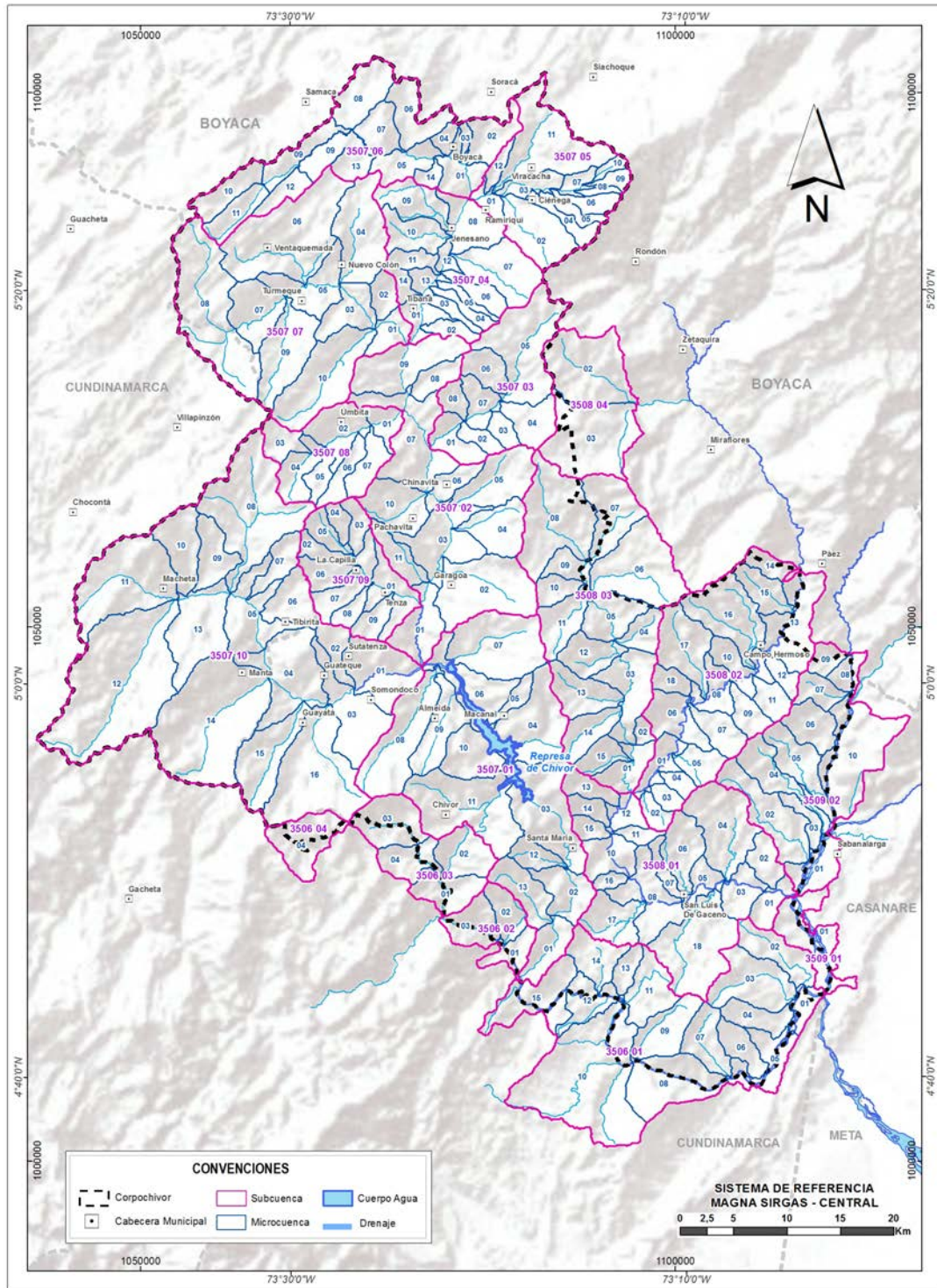


Figura 6. Microcuencas definidas en la Jurisdicción.

### 3.5. Reclasificación de Coberturas y Usos del Suelo

La reclasificación de cobertura y uso de suelo en el área de drenaje de las cuatro subzonas hidrográficas que hacen parte de la jurisdicción de Corpochivor se conformó a partir de un mosaico de dos capas de coberturas de distintas escalas y producidas en diferentes periodos (Figura 7). En este sentido, se empleó, por un lado, una base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) del 2018 [escala 1:25.000] del área administrativa de la corporación; y por el otro, se complementó el área de estudio con la base de datos CLC del 2010-12 [escala 1:100.000], recuperada a través de la plataforma del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). La capa resultante fue reclasificada en 12 categorías, tal como se muestra en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la Figura 7. Finalmente, la capa de coberturas y usos reclasificada fue rasterizada, y luego, transformada en un formato “NetCDF” que permite ser leído directamente en WEAP. En el Anexo 1 se dan más detalles del procedimiento seguido y del archivo final obtenido.



*Figura 7. Diagrama de flujo para la reclasificación de las categorías de coberturas y usos de suelos en el área de drenaje de las cuatro subzonas hidrográficas que hacen parte de la jurisdicción de Corpochivor*

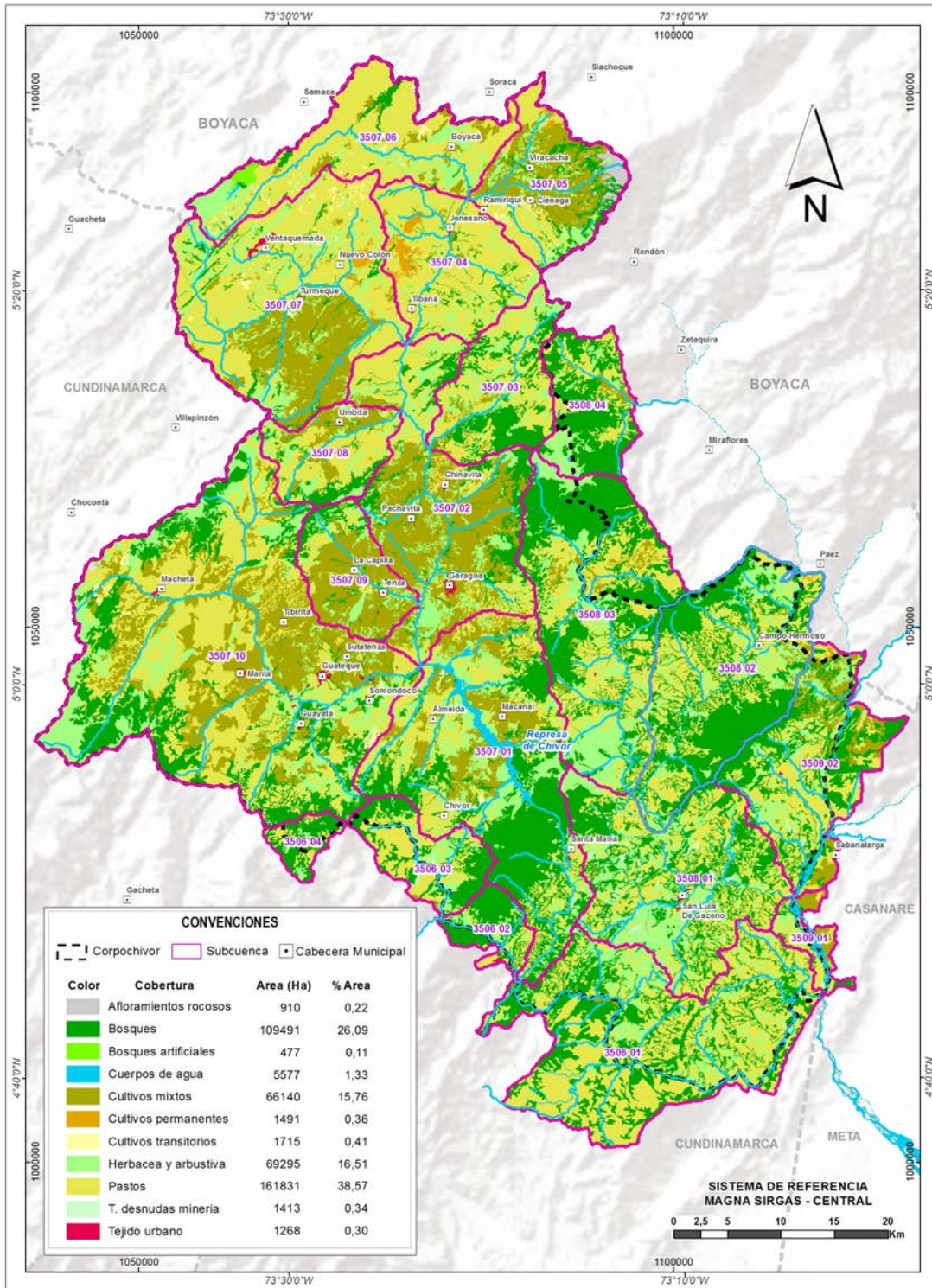


Figura 8. Coberturas y usos de suelos reclasificados en el área de drenaje de las cuatro subzonas hidrográficas que hacen parte de la jurisdicción de Corporchivor

### 3.6. Regionalización de la Climatología Diaria Histórica

La regionalización de variables climáticas tales como precipitación y temperatura siguió una serie de procedimientos, los cuales iniciaron con una recopilación y procesamiento de series históricas provenientes de estaciones climáticas localizadas en la zona de interés (Figura 9). Posteriormente, se realizó un análisis exploratorio y descriptivo de las series de datos con el objetivo de descartar estaciones con considerable datos faltantes o inconsistentes. Luego, por un lado, se empleó validación cruzada para seleccionar el mejor método de interpolación de precipitación; mientras que, por otro lado, se creó un modelo de regresión lineal de la temperatura en función de la elevación. Para ello, se empleó un Modelo Digital de Elevación (DEM) de resolución espectral de 30 metros para generar una cuadrícula de dimensiones similares y reemplazar los valores de elevación del DEM en el modelo de regresión lineal de la temperatura. Las series de datos en formato ráster tanto de la precipitación como la temperatura fueron transformados y compilados en un archivo de formato NetCDF. Mayor detalle del flujo de trabajo para la regionalización de la climatología diaria histórica puede ser encontrado en el Anexo 1.

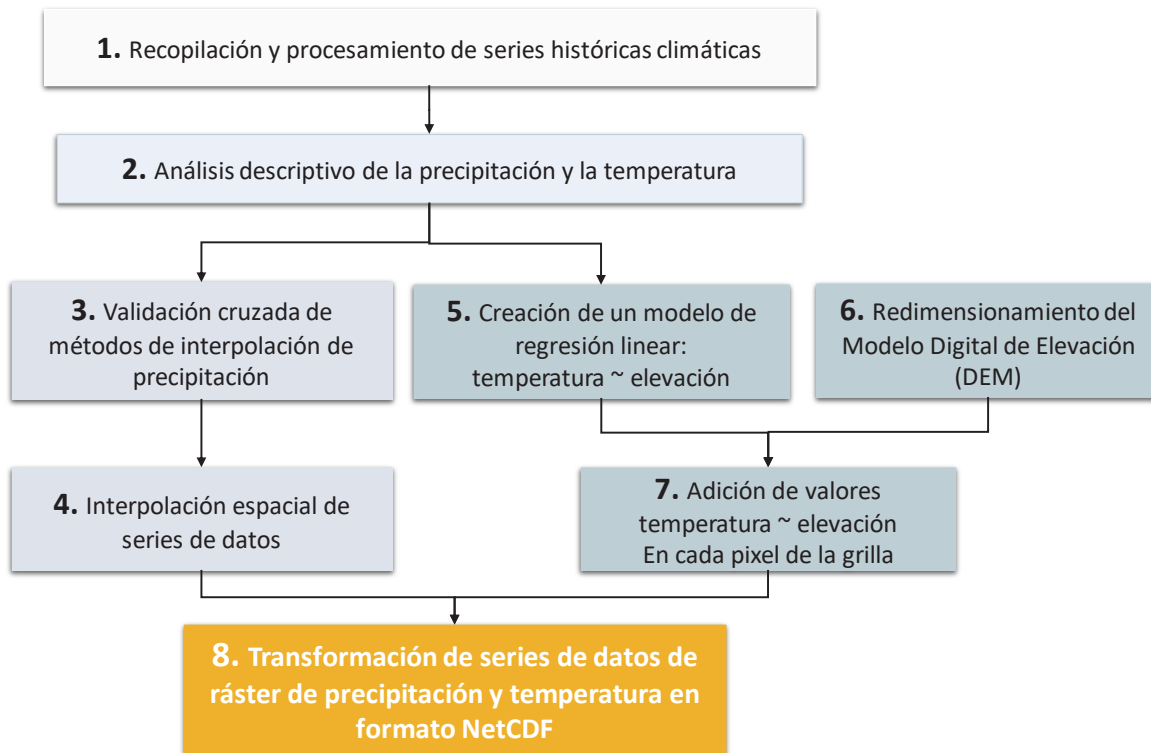


Figura 9. Diagrama del flujo de trabajo para la regionalización del clima histórico diario

### 3.7. Evaluación de la Demanda de Agua

La demanda hídrica comprende la extracción de agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades o requerimientos del consumo humano, la producción sectorial y las demandas de los ecosistemas no antrópicos. Se define como el agua extraída consumida más el agua extraída no consumida (IDEAM; 2013).

Las unidades de análisis para la demanda fueron las mismas establecidas para la modelación hidrológica y fueron agregadas por microcuencas sobre las cuales se calcularon los indicadores de la Evaluación Regional del Agua (ERA).

También se otorgó prioridades de asignación del recurso hídrico, en las captaciones de agua, de acuerdo con las microcuencas ubicadas de aguas arriba a aguas abajo, teniendo mayor prioridad las que se presentan aguas arriba, e incorporando las prioridades de uso, de acuerdo con el Artículo 41 del Decreto 1541 de 1978.

Para la definición de la demanda hídrica se emplearon dos metodologías de cálculo, las cuales se describen en los siguientes numerales.

### **3.7.1. Demanda estimada a partir de la información y consolidación de datos de usos y usuarios de CORPOCHIVOR**

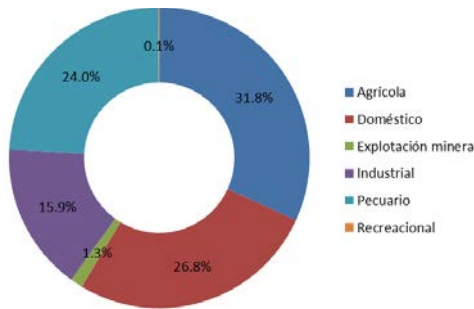
La demanda de agua se estima a partir de la información contenida en las diferentes bases de datos de Usos y Usuarios de CORPOCHIVOR, de acuerdo con las siguientes fuentes de información:

- Demanda de Agua (tomado de Usuarios y demanda (carolina)/Usos del Agua)
- Datos SIRH 2019\_4\_29
- Anexo 10 Cuadro de Distribución VF (tomado de Proyecto: Elaboración de Estudios Técnicos para la Reglamentación de las Microcuencas de la Quebrada Manzanos, Quebrada La Quiña, Quebrada Las Moyitas y Quebrada Suaitoque – Contrato 303-17)
- Base GDB tomada del POMCA.

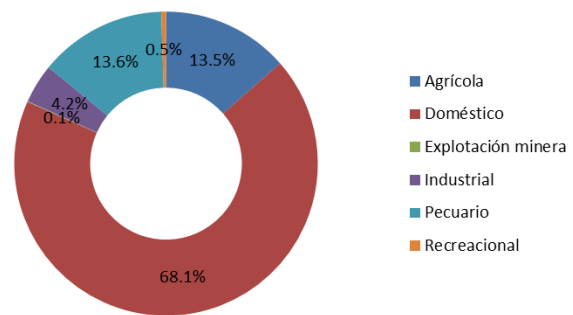
Con los datos contenidos de estas fuentes se efectuó el consolidado de información de concesiones de agua superficial y subterránea, propendiendo por contener la mayor parte de información de caudales concesionados, tipo de uso, frecuencia y coordenadas del punto de captación. Además, se dejó información general, teniendo así, los siguientes campos: Municipio, No. Expediente, Acto administrativo, Fecha de notificación, Usuario, No. ID, ID interno, Usos autorizados, Observaciones – Tipos de uso, Caudal otorgado, Tipo de fuente, Tiempo cobrado y se incluyeron Latitud, Longitud, Observaciones y Fuente de Datos.

El consolidado de información contó con 1613 registros, de los cuales el 56% corresponde a concesiones de agua superficial y un 44% a concesiones de agua subterránea, con el 8.18% de información de concesiones para las cuales no se registran coordenadas, y por ende, no fueron ubicadas en una microcuenca. En total se incluyeron en la base de datos 1489 registros.

A partir del análisis de la información de concesiones se concluye que, para concesiones de agua superficial, el uso con mayor demanda es el agrícola con un 31.8%, seguido del doméstico y pecuario con un 26.8% y un 24%, respectivamente. En el caso de las concesiones de agua subterránea, la mayoría son para uso doméstico, con un 68.1%. Ver Figuras 10 y 11



*Figura 10. Distribución de usos del agua para concesiones de agua superficial.*



*Figura 11. Distribución de usos del agua para concesiones de agua subterránea*

Las concesiones de mayor magnitud (superiores a 10 l/s) corresponden a captaciones de agua superficial y su distribución porcentual corresponde a la presentada en la Figura 10.

Con el fin de identificar la población urbana y rural abastecida por medio de las concesiones registradas, y de estimar la dotación neta de las mismas, se tuvo en cuenta la población registrada según el DANE, para el censo del año 2018. En el Anexo 2 de este documento se presenta la información detallada de la población por cada municipio, así como los caudales concesionados. En la Figura 12 se presenta el caudal concesionado total por tipo de uso de agua (para concesiones superficiales y subterráneas) y en la Figura 13 se presenta el número de concesiones subterráneas y superficiales por tipo de uso del agua.

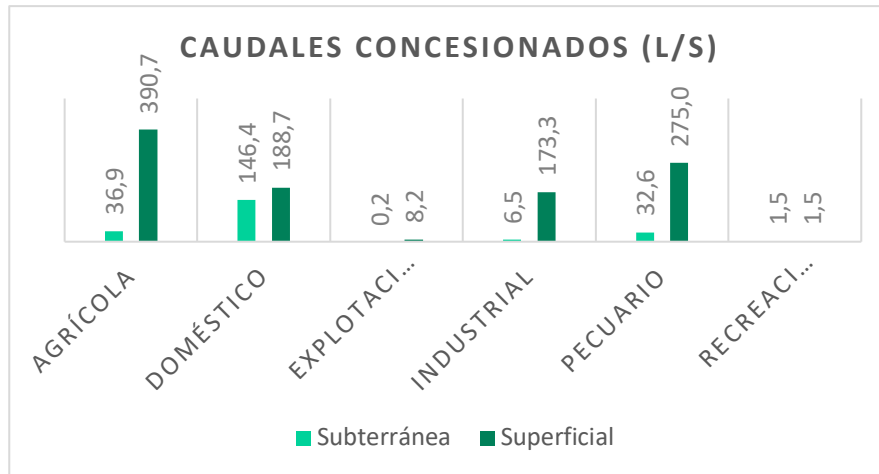


Figura 12. Caudales concesionados por tipo de uso del agua

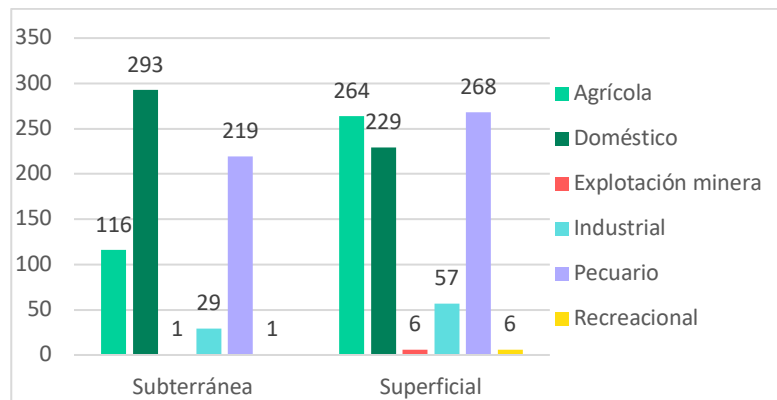


Figura 13. Concesiones por tipo de uso del agua.

### 3.7.2. Demanda Potencial: estimada por medio de módulos de consumo e información secundaria

La demanda de agua estimada por medio de módulos de consumo e información secundaria asociada a usos del suelo y actividades productivas permite estimar la demanda potencial del agua. Este análisis es interesante debido a que permite cuantificar cuanta está consumiendo en actividades que usualmente no tienen concesión de agua como lo son la agricultura o la ganadería.

La estimación potencial de demanda de agua se efectuó por tipos de uso, como se presenta a continuación:

### **Demanda de Agua para Uso Doméstico Urbano y Rural**

Para estimar la demanda de la población urbana y rural se empleó la información del censo población del año 2018 efectuado por el DANE, teniendo en cuenta el valor máximo entre la dotación neta máxima establecida en la Resolución 0330 de 2017 y la dotación neta calculada a partir del caudal concesionado.

### **Demanda de Agua para Uso Agrícola**

La demanda de agua potencial para uso agrícola se estimó a partir del mapa de cobertura vegetal con el cual se elaboró el modelo hidrológico en WEAP, asumiendo que se efectuaba riego en el 50% de los cultivos permanentes, transitorios y mixtos.

Para establecer los módulos de consumo, se consultaron los productos agrícolas destacados en los municipios ubicados en las cuencas, a partir de la información contenida en las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y las Secretarías de Agricultura Departamentales, Alcaldías Municipales del año 2018.

Entre los grupos de cultivos que siembran en los municipios se destacan el grupo de los tubérculos y los plátanos, seguido de los frutales, las leguminosas

y en menor cuantía, cereales, hortalizas y otros cultivos permanentes (Ver Figura 14)

De estos grupos de cultivos, se catalogan como cultivos permanentes los cultivos con mayor área sembrada de pera, seguido en menor cuantía de cultivos de ciruela, curuba y plátano, entre otros, como caña de miel, manzana, tomate de árbol, durazno, feijoa, lulo, naranja, caña panelera, cítricos, mora, frutales, banano, cacao, fique, granadilla, achira, limón, aguacate, café, papaya, etc.

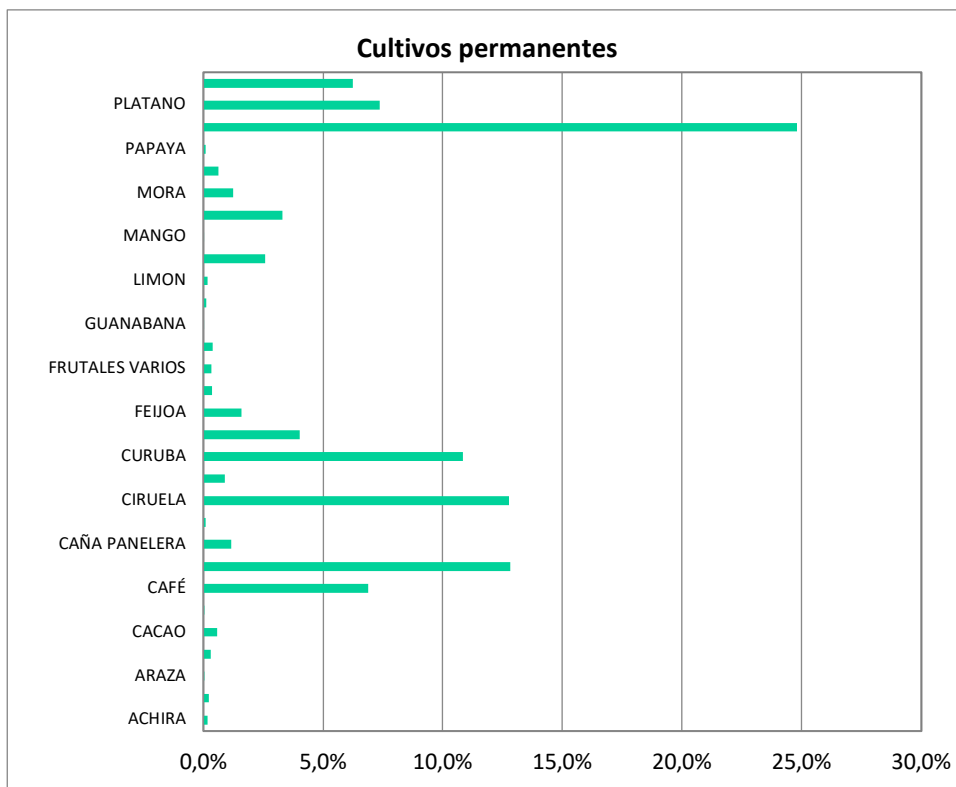
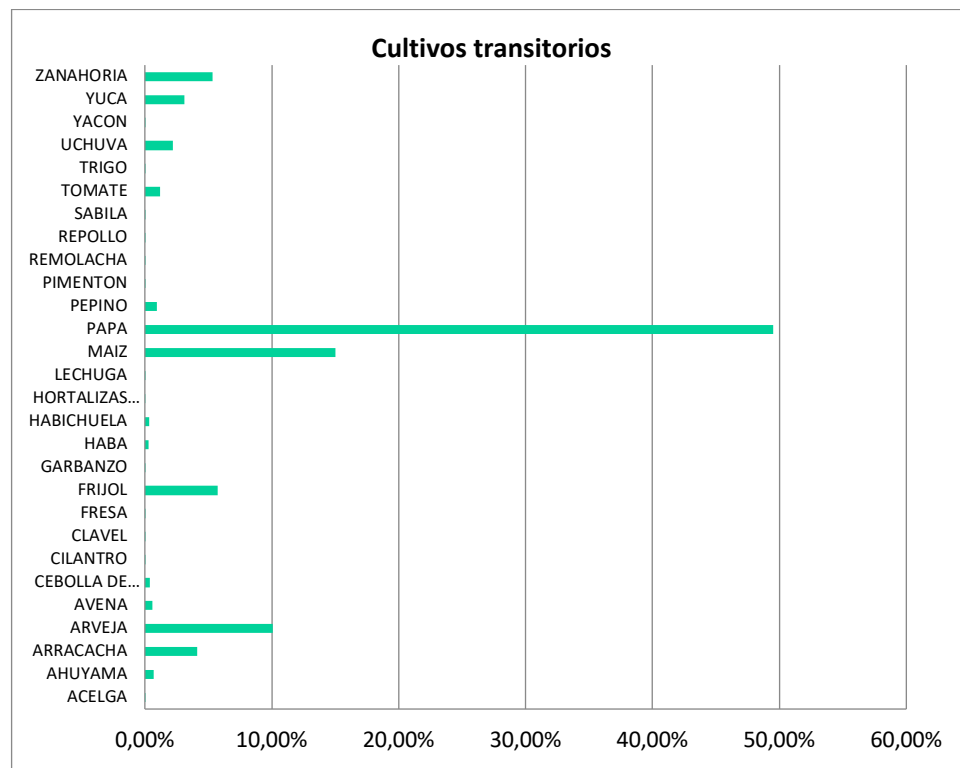


Figura 14. Distribución porcentual del área sembrada de cultivos permanentes en los municipios de las cuencas del área de estudio.

Entre los cultivos transitorios, los cultivos con mayor área sembrada se destacan la papa, seguida de la arveja, zanahoria, maíz, yuca, arracacha, frijol, uchuva, avena, ahuyama, entre otros, como tomate, cebolla de bulbo, pepino, haba, habichuela (Ver Figura 15).



*Figura 15. Distribución porcentual del área sembrada de cultivos transitorios en los municipios de las cuencas del área de estudio.*

Teniendo en cuenta los cultivos anteriormente descritos, se consultaron los módulos de consumo de acuerdo con estudios efectuados por CORPOBOYACA y CAR. Posteriormente, se calcularon los módulos de consumo para cultivos transitorios y permanentes, ponderándolos. De acuerdo con las hectáreas sembradas en las cuencas, se obtuvo un módulo de riego para cultivos transitorios de 0.42 l/s ha, para cultivos permanentes de 0.79 l/s

ha, para cultivos mixtos, para pastos de 0.41 l/s ha, y el promedio de éstos, para cultivos mixtos de 0.54 l/s ha.

*Tabla 2. Módulos de riego ponderados por área sembrada, para cultivos permanentes y transitorios.*

| CULTIVOS         | TIPO  | POND  | CBOYACA (L/s ha) | CAR (L/s ha) | MAX  | MÓDULO POND |
|------------------|-------|-------|------------------|--------------|------|-------------|
| ARRACACHA        | Trans | 4.2%  | 0.31             |              | 0.31 | 0.013       |
| ARVEJA           | Trans | 10.3% | 0.37             | 0.36         | 0.37 | 0.038       |
| CEBOLLA DE BULBO | Trans | 0.4%  | 0.49             | 0.49         | 0.49 | 0.002       |
| CLAVEL           | Trans | 0.0%  |                  | 0.53         | 0.53 | 0.002       |
| FRESA            | Trans | 0.0%  | 0.18             | 0.3          | 0.3  | 2.95E-05    |
| FRIJOL           | Trans | 5.9%  | 0.32             | 0.49         | 0.49 | 0.028       |
| HABA             | Trans | 0.3%  | 0.37             |              | 0.37 | 0.001       |
| HABICHUELA       | Trans | 0.4%  |                  | 0.19         | 0.19 | 0.0007      |
| LECHUGA          | Trans | 0.0%  |                  | 0.3          | 0.3  | 6.17E-05    |
| MAIZ             | Trans | 15.4% | 0.26             | 0.38         | 0.38 | 0.058       |
| PAPA             | Trans | 50.7% | 0.31             | 0.41         | 0.41 | 0.208       |
| REPOLLO          | Trans | 0.0%  |                  | 0.27         | 0.27 | 1.8E-05     |
| TOMATE           | Trans | 1.2%  | 0.35             | 0.22         | 0.35 | 0.004       |
| TRIGO            | Trans | 0.0%  | 0.22             |              | 0.22 | 8.30E-05    |
| UCHUVA           | Trans | 2.3%  | 0.46             | 1.47         | 1.47 | 0.033       |
| YUCA             | Trans | 3.2%  | 0.22             |              | 0.22 | 0.007       |
| ZANAHORIA        | Trans | 5.5%  | 0.36             | 0.31         | 0.36 | 0.019       |
| AGUACATE         | Perm  | 0.3%  | 0.14             | 2.17         | 2.17 | 0.005       |
| CACAO            | Perm  | 0.7%  | 0.43             | 0.51         | 0.51 | 0.003       |
| CAFÉ             | Perm  | 8.1%  | 0.38             | 0.45         | 0.45 | 0.036       |
| CAÑA PANELERA    | Perm  | 1.4%  | 0.31             | 0.22         | 0.31 | 0.004       |
| CIRUELA          | Perm  | 15.0% | 0.26             | 1.29         | 1.29 | 0.194       |
| CURUBA           | Perm  | 12.8% | 0.26             | 0.35         | 0.35 | 0.044       |
| DURAZNO          | Perm  | 4.7%  | 0.24             | 1.03         | 1.03 | 0.049       |
| FEIJOA           | Perm  | 1.9%  | 0.46             |              | 0.46 | 0.009       |
| GRANADILLA       | Perm  | 0.4%  | 0.29             | 0.42         | 0.42 | 0.002       |
| GUANABANA        | Perm  | 0.0%  | 0.19             |              | 0.19 | 3.51E-06    |
| GULUPA           | Perm  | 0.1%  |                  | 0.32         | 0.32 | 0.0004      |
| LIMON            | Perm  | 0.2%  |                  | 0.37         | 0.37 | 0.0007      |
| LULO             | Perm  | 3.0%  | 0.21             | 0.21         | 0.21 | 0.006       |
| MANGO            | Perm  | 0.0%  | 0.34             |              | 0.34 | 6.28E-06    |
| MANZANA          | Perm  | 3.9%  | 0.35             | 1.75         | 1.75 | 0.068       |

| CULTIVOS        | TIPO | POND  | CBOYACA (L/s ha) | CAR (L/s ha) | MAX  | MÓDULO POND |
|-----------------|------|-------|------------------|--------------|------|-------------|
| MORA            | Perm | 1.5%  | 0.22             | 1.33         | 1.33 | 0.019       |
| NARANJA         | Perm | 0.7%  |                  | 0.35         | 0.35 | 0.0026      |
| PERA            | Perm | 29.2% |                  | 0.96         | 0.96 | 0.280       |
| PLATANO         | Perm | 8.7%  | 0.37             |              | 0.37 | 0.032       |
| TOMATE DE ARBOL | Perm | 7.3%  |                  | 0.37         | 0.37 | 0.027       |
| PASTOS          |      |       | 0.41             |              | 0.41 | 0.41        |

La demanda potencial para el sector agrícola se calculó a partir de los módulos de consumo anteriormente descritos, y estableciendo un periodo de riego de 5 meses al año.

### **Demanda de Agua para Uso Pecuario**

La demanda de agua potencial para uso pecuario, específicamente para producción bovina, se estimó a partir de la carga por hectárea de pasto o forraje de un animal, una vaca de 450 kg de peso vivo o un novillo de 500 kg de peso vivo (UGG/ha), de acuerdo al mapa de cobertura vegetal.

Además, se estimó la producción potencial en las microcuencas a partir de la información de producción pecuaria de los municipios ubicados en las cuencas, publicada por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) para el año 2018, para producción avícola y piscícola.

Se tuvo en cuenta la dotación neta diaria de los sectores presentados en la siguiente tabla, de acuerdo principalmente a los rangos de los módulos establecidos por CORPOCHIVOR (2016) y tomados en el PORH:

| <b>PRODUCCIÓN<br/>PECUARIA</b> | <b>MÓDULO DECONSUMO<br/>(l/animal día)</b> |
|--------------------------------|--|
| Bovino                         | 35   |
| Piscícola                      | 8  |
| Avícola                        | 0.3  |

### **Demanda de Agua para Uso Industrial, Minero y de Servicios**

Para los usos del agua de tipo industrial, minero y de servicios no se estimaron demandas potenciales, sino que se tomó la información registrada en concesiones, para cada microcuenca simulada en WEAP.

Con la información de la base de datos de usos y usuarios se realizó la disgregación de demanda concesionada por tipo de uso para cada una de las microcuencas, obteniendo el consolidado de caudales que se presenta en el Anexo 3 de este informe.

### **3.8. Calibración del Modelo Hidrológico.**

Los modelos hidrológicos incluyen una serie de parámetros que responden a las condiciones propias locales, pero que tienen sentido físico y, por lo tanto, un rango de operación. Estas variaciones de los parámetros muestran un comportamiento diferenciado de los modelos de acuerdo con el lugar donde se han implementado. La calibración del modelo busca lograr que la respuesta hidrológica que el modelo calcula se acerque lo más posible a las mediciones de caudal capturadas en campo.

El modelo hidrológico de WEAP es el “Soil Moisture Model” (SMM) (Yates, Sieber, Pukey, & Huber-Lee, 2005). El SMM es un modelo unidimensional, el cual consiste en la noción de transferencia de agua entre dos baldes (buckets), los cuales representan la dinámica entre la evapotranspiración, escurrimiento superficial, escurrimiento sub-superficial, percolación, para un elemento de análisis o cuenca. La información detallada del modelo, parámetros y ecuaciones puede consultarse en el anexo 3 de este documento.

En la Figura 16 se puede observar la ubicación de las estaciones Hidrológicas usadas para hacer la calibración de los parámetros hidrológicos del modelo, a partir de series de tiempo de mediciones de caudal en los cuerpos de agua.



En la Figura 17 se observa la topología del sistema y las estaciones de medición de caudal en el sistema analizado. En la Figura 18 se puede ver un ejemplo de comparación de las series de caudales medios diarios modelados y observados en la estación Caracol. La comparación de estas dos series en todas las estaciones permite establecer la capacidad de reproducir el comportamiento hidrológico de la cuenca.

En la Tabla 3 se resumen los resultados de los cálculos de las métricas de desempeño para determinar la capacidad predictiva del modelo. En general puede observarse que el modelo representa las observaciones de caudal existentes. En la estación San José se presenta un bajo desempeño, que puede estar relacionado con el almacenamiento de agua aguas arriba y del cual no se cuenta con información suficiente para representarlo en el modelo. El modelo puede ajustarse en la medida que se cuente con información de entrada que permita describir el comportamiento físico de estructuras existentes y almacenamientos temporales.

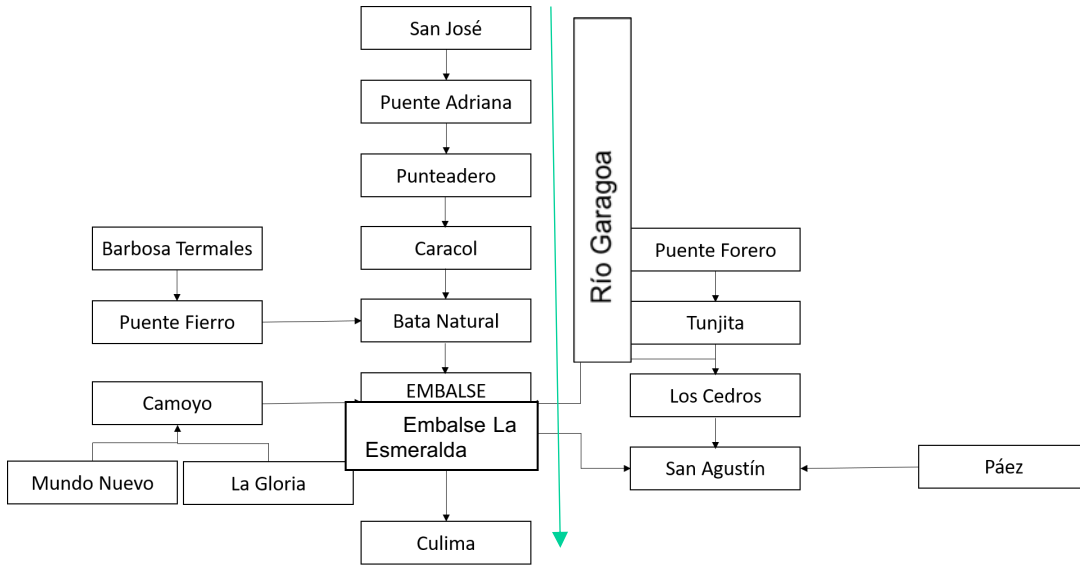


Figura 17. Esquema de ubicación de estaciones hidrométricas en la cuenca de estudio

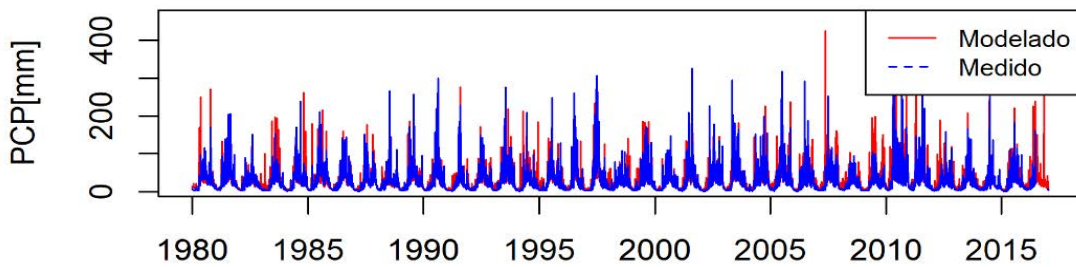


Figura 18. Caudales medios diarios medidos y modelados en la estación Caracol

Tabla 3. Métricas de desempeño del modelo hidrológico en diferentes puntos de medición de caudales

| Estación         | NSE (total) | NSE (max) | NSE (min) | Pbias [%] |
|------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Barbosa Termales | -0.65       | 0.35      | -24.49    | -13.30    |
| Bata Natural     | 0.34        | 0.60      | -0.17     | -21.50    |
| Camoyo           | -0.51       | 0.21      | -18.26    | 12.20     |
| Caracol          | 0.31        | 0.63      | -0.80     | 12.10     |
| Culima           |             |           |           |           |
| La Gloria        | 0.05        | 0.38      | -0.61     | -17.30    |
| Los Cedros       |             |           |           |           |
| Mundo Nuevo      | -0.17       | 0.34      | -6.85     | -8.70     |
| Paez             | 0.15        | 0.50      | -0.58     | -1.90     |
| Puente Adriana   | -0.41       | 0.34      | -9.11     | -6.50     |
| Puente Fierro    | 0.06        | 0.45      | -1.03     | -15.50    |
| Puente Forero    | 0.12        | 0.38      | -0.55     | -11.80    |
| Punteadero       | 0.04        | 0.65      | -0.95     | 11.60     |
| San Agustín      | -0.02       | 0.18      | -0.59     | -11.00    |
| San José         | -2.82       | 0.36      | -129.15   | 60.90     |
| Teatinos         |             |           |           |           |
| Tunjita          | -0.08       | 0.45      | -0.92     | -2.20     |

### 3.9. Procedimiento para la Evaluación de los Indicadores Hídricos Regionales en un Modelo basado en WEAP

Para evaluar 7 indicadores hídricos regionales a través de WEAP se desarrolló una serie de rutinas en Visual Basic Script (VBScript), agrupadas en cinco (5) pasos como se muestra en la Figura 19. Estos cinco pasos están almacenados en un archivo llamado “ERA functions.vbs” el cual se encuentra en la carpeta del modelo. En el primer paso se activan las posibles combinaciones de los escenarios climáticos (histórico, Modelo de Circulación Global 1 y Modelo de Circulación Global 2) y de demandas (concesiones y potencial) las cuales van a correr en bucle. WEAP realizará un balance hídrico

para cada una de las seis (6) posibles combinaciones. En el segundo paso se crea una lista de las unidades hidrográficas de análisis (216 microcuencas en este caso) a partir de los Enlaces (Links) de Escorrentía/Infiltración. Lo anterior obedece a que cada Enlace (299) está conectado a un nodo de Unidad Hidrológica (216) o de Unidad Hidrogeológica (83). Se hace un filtro para enlistar el primer tipo de unidades.

El tercer y cuarto paso se realizan de forma paralela y durante cada bucle. Se extraen resultados de cada componente del balance hídrico y se calculan los correspondientes indicadores hídricos regionales. En este sentido se extraen, para cada microcuenca, valores de los siguientes parámetros: caudales medios multianuales (OHRD), caudales mínimos mensuales (OHMD), recarga neta media (R), evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración actual (ETA), demanda hídrica superficial (Dh), demanda hídrica subterránea (Q\_extracción), demanda hídrica subterránea para uso doméstico (Q\_extracción\_uso\_domestico), y población (pob).

En el quinto paso se genera un archivo llamado "ERAs.csv" el cual está almacenado en una carpeta "ERA\_Output" dentro de la carpeta del modelo. Este archivo contiene el código de cada microcuenca o unidad hidrológica de análisis, valores y categorías de cada uno de los siete (7) indicadores hídricos para cada escenario de demanda y su correspondiente escenario climático, el año usado para el umbral de población y el número de la población. Este

archivo fue importado a una herramienta SIG para producir la cartografía de cada indicador hídrico regional.

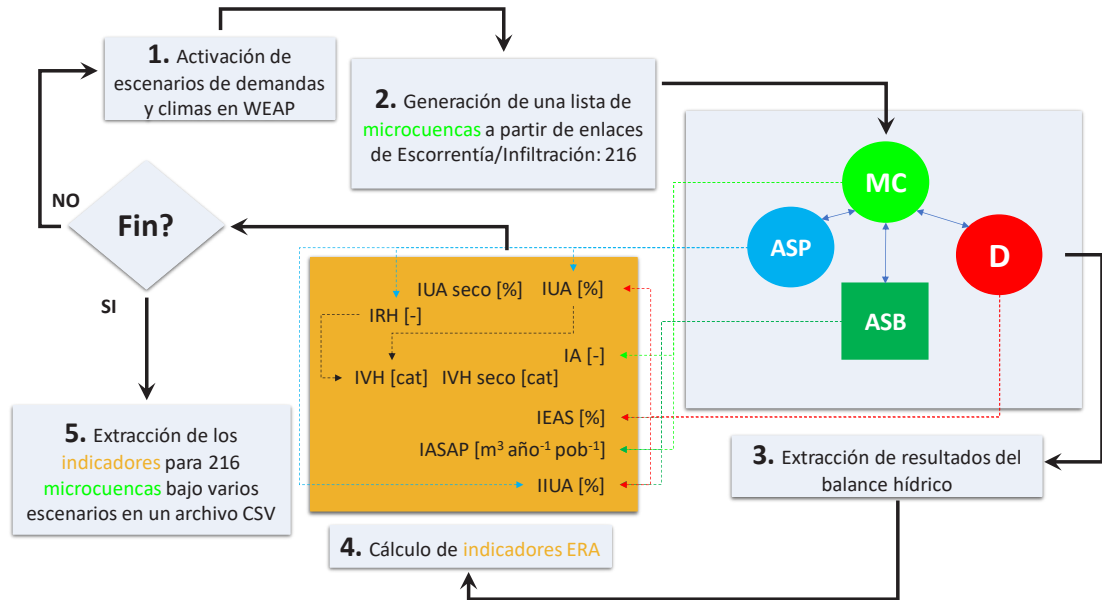


Figura 19. Diagrama de flujo del procedimiento seguido para evaluar los indicadores hídricos regionales en WEAP

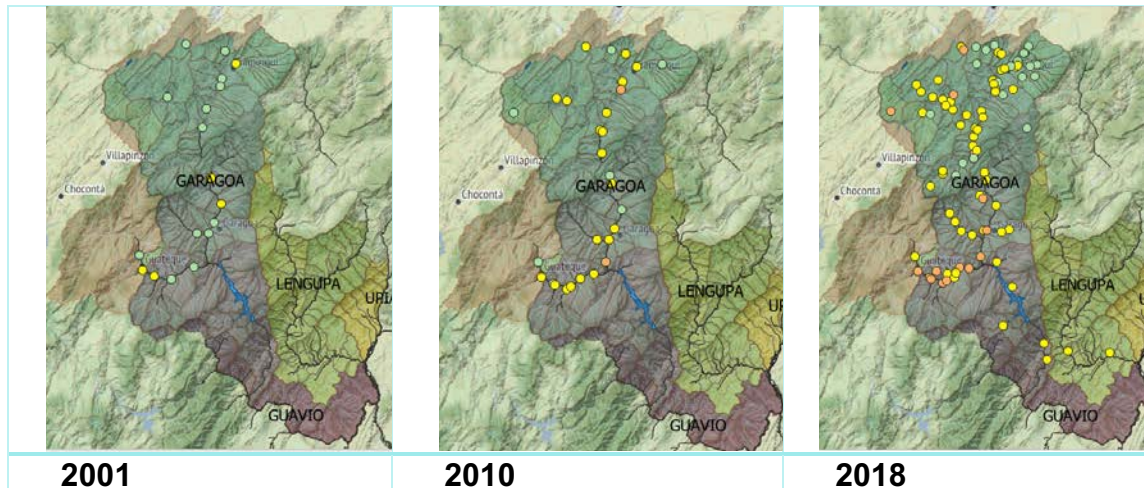
### 3.10. Calidad de agua

La evaluación de calidad de agua en la Jurisdicción de Corpochivor se realiza de acuerdo con la información existente regional de los monitoreos realizados de forma regular en el programa de monitoreo de la Corporación, como de los proyectos que han realizado y que se encuentran consolidados en la base de datos existente.

La base de datos fue organizada y depurada para obtener estadísticos representativos y tendencias de calidad de agua en los puntos de monitoreo. Los puntos de monitoreo del programa de la Corporación se han mantenido desde su inicio en el año 2001 hasta la fecha, y se han ido incorporando nuevos puntos de acuerdo con las necesidades. En la Figura 20 se observan tres imágenes con los puntos de monitoreo ubicados en la Corporación en los años 2001, 2010 y 2018. Los puntos que se presentan corresponden a todos los puntos que se han monitoreado en la cuenca durante ese año. La diferencia de los colores corresponde al ICA IDEAM calculado en cada punto y que se discutirá en el capítulo 5.

Debido a que el río Garagoa es el afluente principal en esta Corporación, del cual depende un alto porcentaje de la población para sus actividades económicas y domésticas, es el río que más se ha monitoreado en la región.

Sin embargo, la cantidad de puntos monitoreados ha ido aumentando como puede observarse en la Figura 20.



*Figura 20. Muestras de calidad de agua en tres años de la serie 2001, 2010, 2018*

Los parámetros de calidad de agua que se monitorean son los que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. *Parámetros de calidad de agua monitoreados*

| Parámetro        | Unidades                      |
|------------------|-------------------------------|
| HIERRO           | (mg/l Fe)                     |
| FOSFATOS         | (mg/l PO <sub>4</sub> )       |
| O.D              | (mg/l O <sub>2</sub> )        |
| K                | ( mS/cm)                      |
| TURBIEDAD        | (NTU)                         |
| pH               | (Unid.)                       |
| TEMPERATURA      | ("C)                          |
| NITRATOS         | (mg/l NO <sub>3</sub> )       |
| NITRITOS         | (mg/l NO <sub>2</sub> )       |
| NITR. AMONIACAL  | (mg/l NH <sub>3</sub> )       |
| SULFATOS         | (mg/l SO <sub>4</sub> )       |
| CLORUROS         | (mg/l CL)                     |
| COLOR AP.        | (Un. Pt.Co )                  |
| COLOR REAL       | Un. Pt.Co.                    |
| DBO <sub>5</sub> | (mg/l O <sub>2</sub> )        |
| DQO              | (mg/l )                       |
| ST               | (mg/l )                       |
| SST              | (mg/l )                       |
| SD               | (mg/l )                       |
| COLIF.TOT.       | (UFC/100<br>cm <sup>3</sup> ) |
| E.COLI           | (UFC/100cm <sup>3</sup> )     |

A partir de la base de datos proporcionada por la Corporación Corpochivor, se organizó una base de datos en Excel que permite visualizar de forma dinámica los monitoreos de los determinantes de calidad de agua en QGIS, del indicador ICA calculado de acuerdo con la metodología del IDEAM (para 6 y 7 parámetros) y el ICA calculado para 11 parámetros definido en Corpochivor.

Corpochivor definió un indicador de calidad de agua que permite integrar 11 parámetros de calidad de agua a ser analizados en cada cuerpo hídrico *i.e.* Oxígeno Disuelto OD, Conductividad K, Turbiedad, pH, Temperatura T, Amonio

NO<sub>3</sub>, Sulfatos SO<sub>4</sub>, Cloruros CL, DBO, ST, Coliformes Totales. El detalle del cálculo de este indicador denominado ICA Corpochivor se desarrolla en el capítulo 4.

Los resultados de los ICA IDEAM e ICA CORPOCHIVOR obtenidos en los 1998 muestreos finales en la base de datos consolidada y depurada, se comparan a través de análisis estadísticos. En la Figura 21 se presentan BOXPLOT de los resultados del ICA IDEAM a la izquierda e ICA Corpochivor a la derecha. Puede observarse que la dispersión del índice es inferior para ICA Corpochivor que para el ICA IDEAM. El ICA IDEAM incluye 5 rangos de clasificación mientras que el ICA Corpochivor incluye 4 rangos, razón por la cual en el segundo índice no se ve una diferencia entre los muestreos, mostrando en la mayoría de los casos una calidad “Corrientes con índices de contaminación”, mientras que con el indicador de IDEAM se muestra una calidad entre aceptable y regular.

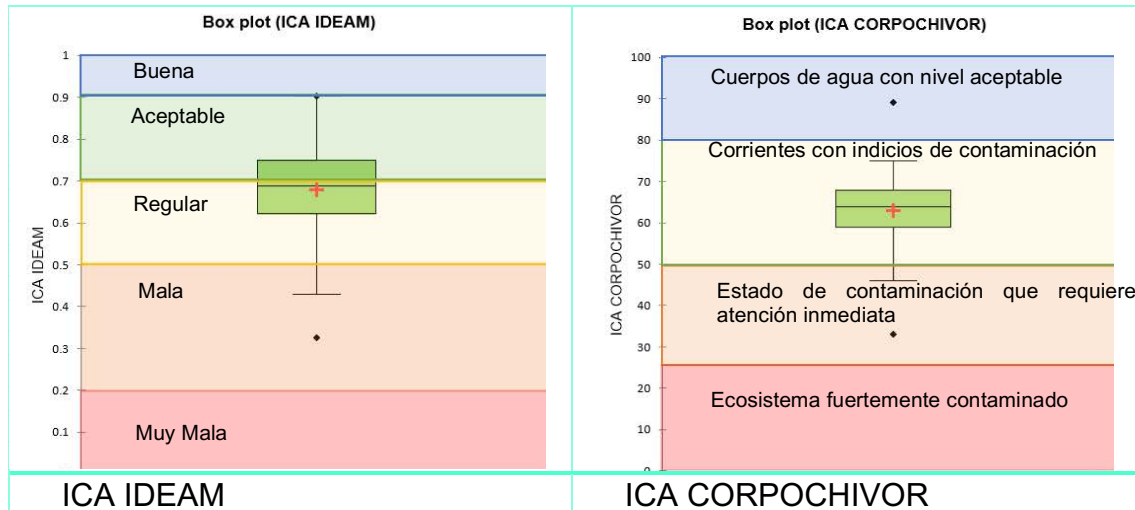


Figura 21. Box Plot ICA IDEAM e ICA CORPOCHIVOR.

### 3.11. Desarrollo de Escenarios Prospectivos

Como se abordó en el planteamiento conceptual del modelo, los indicadores de la ERA se calculan tanto en el escenario de clima histórico como en dos escenarios de cambio climático que incluyen el crecimiento de la población con una proyección al año 2050. En este capítulo y los Anexos 2 y 4 se explica como se obtuvieron estos escenarios.

#### 3.11.1. Escenarios Climáticos

En este estudio se usaron dos escenarios de cambio climático que permiten analizar posibles futuros del clima, con especial énfasis en su variabilidad. Los indicadores definidos en la ERA y en general las decisiones de gestión del recurso hídrico, presentan mayores desafíos en condiciones climáticas extremas, tales como los años secos o húmedos. Los escenarios de cambio

climático definidos en este estudio permiten analizar la variabilidad del clima cambiante y de esta forma calcular los indicadores del ERA para años secos.

En la Figura 22 se resume la metodología implementada en el presente estudio.

En el anexo 4 puede consultarse detalladamente acerca del desarrollo de dicha metodología.

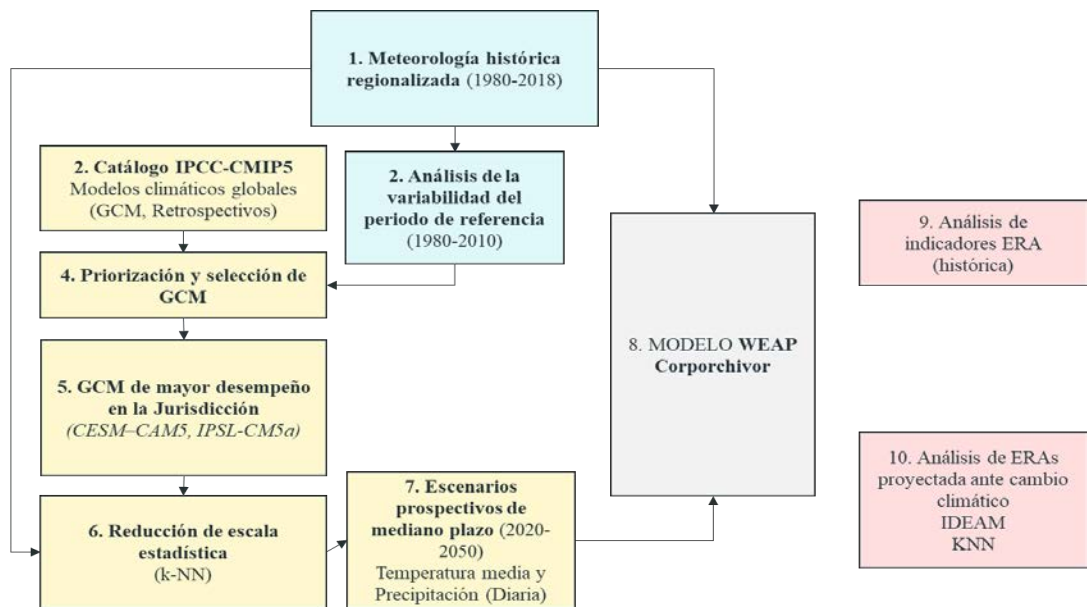


Figura 22. Metodología para generar series climáticas.

En la Tabla 5 se presenta el resultado de los parámetros de evaluación de los modelos de circulación global evaluados y su ajuste a las características propias climáticas en el área de la Jurisdicción de Corpochivor. Los dos escenarios que tienen mejor desempeño son resaltados en gris.

En las Figuras 23, 24 y 25 se presentan las anomalías en la Temperatura y los Cambios en temperatura y precipitación para los dos escenarios definidos.

Ver Anexo 4 para más detalles.

*Tabla 5. Sesgo relativo (PR) de los diferentes GCM según los diferentes criterios de desempeño en la Jurisdicción de Corpochivor. Los dos modelos seleccionados se señalan en negrilla*

| Modelo                        | wet_spell_length | wet_fraction | Percentile_5 | mean       | dry_spell_length | Seasonal Pattern | Oscilaciones seculares |
|-------------------------------|------------------|--------------|--------------|------------|------------------|------------------|------------------------|
| bcc-csm1-1-m-regridded        | -17%             | -15%         | -53%         | -51%       | 53%              | No               | No                     |
| bcc-csm1-1-regridded          | -11%             | -13%         | 63%          | 11%        | 50%              | No               | No                     |
| bnu-esm-regridded             | 355%             | 15%          | -20%         | 18%        | 80%              | No               | No                     |
| cmcc-cesm-regridded           | 41%              | 10%          | -39%         | -15%       | -18%             | No               | No                     |
| cmcc-cm-regridded             | -7%              | 3%           | 14%          | 8%         | -19%             | No               | No                     |
| cmcc-cms-regridded            | -14%             | -4%          | -22%         | -18%       | 4%               | No               | No                     |
| gfdl-cm3-regridded            | 61%              | -10%         | -51%         | -50%       | 142%             | No               | No                     |
| gfdl-esm2g-regridded          | 76%              | -21%         | -28%         | -32%       | 285%             | No               | No                     |
| gfdl-esm2m-regridded          | 77%              | -20%         | -24%         | -28%       | 284%             | No               | No                     |
| miroc5-regridded              | 254%             | 16%          | 62%          | 98%        | 24%              | No               | No                     |
| miroc-esm-chem-regridded      | 46%              | -1%          | -19%         | -4%        | 51%              | No               | No                     |
| miroc-esm-regridded           | 53%              | 2%           | -15%         | 1%         | 37%              | No               | No                     |
| mpi-esm-mr-regridded          | -35%             | -18%         | -23%         | -28%       | 32%              | No               | No                     |
| cesm1-bgc-regridded           | 49%              | -5%          | 7%           | 3%         | 81%              | Si               | No                     |
| <b>cesm1-cam5-regridded</b>   | <b>114%</b>      | <b>6%</b>    | <b>6%</b>    | <b>4%</b>  | <b>59%</b>       | <b>Si</b>        | <b>Si</b>              |
| <b>ipsl-cm5a-lr-regridded</b> | <b>95%</b>       | <b>-6%</b>   | <b>5%</b>    | <b>11%</b> | <b>157%</b>      | <b>Si</b>        | <b>Si</b>              |
| ipsl-cm5a-mr-regridded        | 34%              | -15%         | 34%          | 6%         | 141%             | Si               | No                     |

Figura 23. Anomalía de precipitación anual proyectada en los dos modelos seleccionados (Superior) cesm1-cam5 (Inferior) ipsl-cm5a-lr

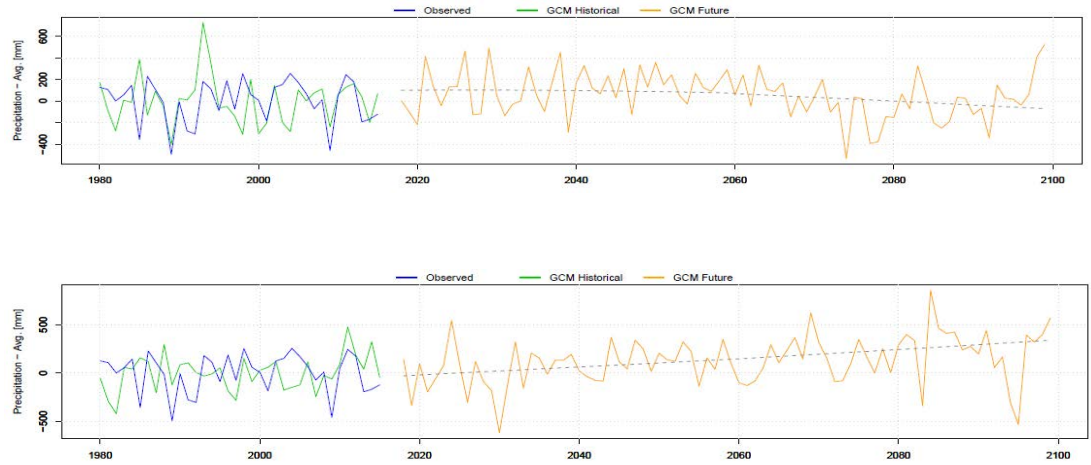


Figura 24. Señal media anual de incremento de la temperatura

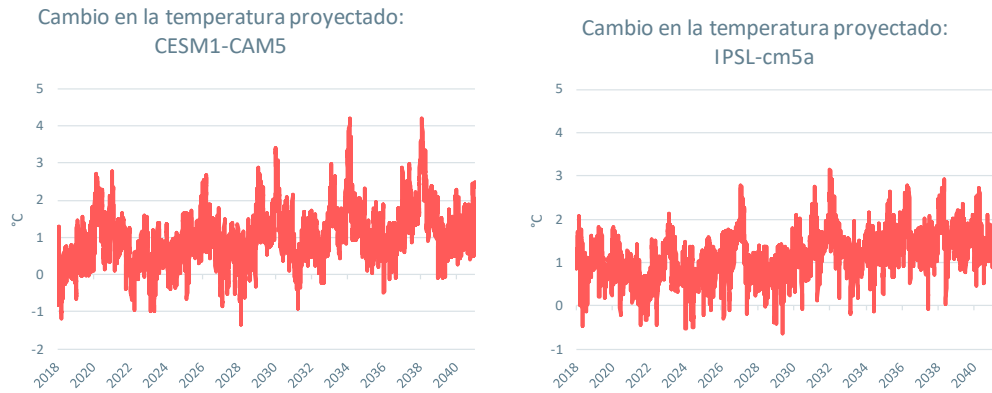
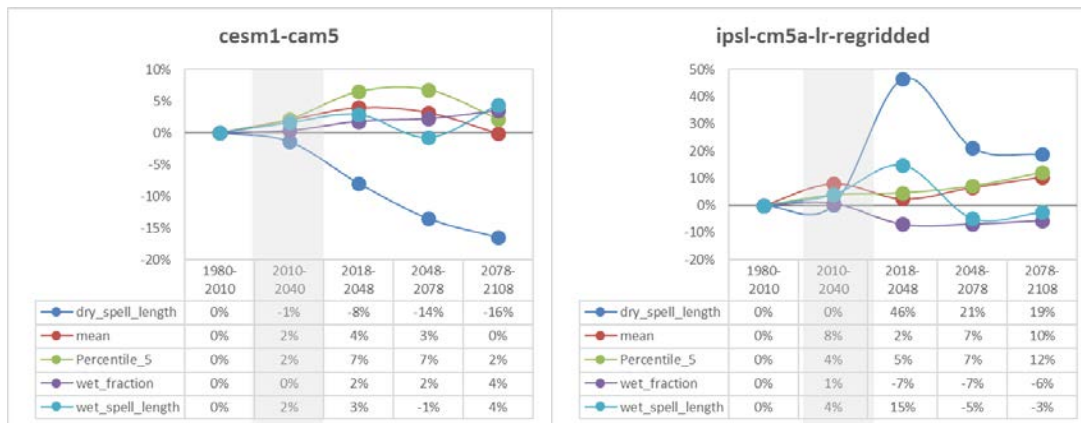


Figura 25. Cambios en los atributos periodos climáticos desde 1850 a 2090 para los dos modelos de mejor desempeño



### 3.11.2. Escenarios de Proyección de la demanda

Para el escenario futuro de demanda de agua, se proyectó un aumento de consumo por concepto del aumento poblacional, para el caso de consumo doméstico para población de los centros urbanos.

Este aumento de consumo de agua por parte de la población urbana se estimó a partir de los datos de la dinámica demográfica registrada por medio de los censos poblacionales efectuados por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) en los años 2005 y 2018, teniendo en cuenta la tasa de crecimiento o decrecimiento registrada entre estos años, para los cascos urbanos y el área rural de los municipios ubicados en las cuencas. (ver Tabla 6)

Tabla 6. Tasa de crecimiento o decrecimiento de la población municipal urbana y rural presente en las cuencas objeto de estudio.

| No. | MUNICIPIO          | AÑO 2005 |       | AÑO 2018 |       | TASA   |        |
|-----|--------------------|----------|-------|----------|-------|--------|--------|
|     |                    | URBANA   | RURAL | URBANA   | RURAL | URBANA | RURAL  |
| 1   | BOYACÁ             | 423      | 4524  | 761      | 4328  | 4.3%   | -0.3%  |
| 2   | VIRACACHÁ          | 372      | 3008  | 426      | 2411  | 1.0%   | -1.6%  |
| 3   | CIÉNEGA            | 1240     | 3856  | 1207     | 3428  | -0.2%  | -0.8%  |
| 4   | RAMIRIQUÍ          | 3944     | 5756  | 4053     | 5834  | 0.2%   | 0.1%   |
| 5   | JENESANO           | 1590     | 5697  | 1696     | 5504  | 0.5%   | -0.2%  |
| 6   | VENTAQUEMADA       | 1946     | 12220 | 2345     | 13361 | 1.3%   | 0.6%   |
| 7   | NUEVO COLÓN        | 1034     | 4928  | 993      | 4128  | -0.3%  | -1.3%  |
| 8   | TURMEQUÉ           | 2384     | 4963  | 2072     | 4046  | -1.0%  | -1.4%  |
| 9   | TIBANÁ             | 1520     | 7944  | 1729     | 7322  | 0.9%   | -0.6%  |
| 10  | UMBITA             | 1566     | 8322  | 1019     | 6511  | -3.0%  | -1.7%  |
| 11  | CHINAVITA          | 1163     | 2488  | 1231     | 1978  | 0.4%   | -1.6%  |
| 12  | PACHAVITA          | 451      | 2517  | 520      | 1947  | 1.0%   | -1.8%  |
| 13  | LA CAPILLA         | 1006     | 2046  | 1012     | 1677  | 0.04%  | -1.4%  |
| 14  | GARAGOA            | 12084    | 4111  | 12358    | 5574  | 0.2%   | 2.2%   |
| 15  | TENZA              | 1181     | 3332  | 1127     | 2724  | -0.3%  | -1.4%  |
| 16  | CAMPOHERMOSO       | 845      | 3104  | 767      | 2354  | -0.7%  | -2.0%  |
| 17  | SUTATENZA          | 729      | 3715  | 732      | 3501  | 0.03%  | -0.4%  |
| 18  | GUATEQUE           | 6985     | 2936  | 7631     | 3068  | 0.6%   | 0.3%   |
| 20  | SOMONDOCO          | 741      | 2505  | 655      | 2255  | -0.9%  | -0.7%  |
| 21  | ALMEIDA            | 296      | 1875  | 321      | 1589  | 0.6%   | -1.2%  |
| 22  | MACANAL            | 938      | 3673  | 1134     | 3842  | 1.4%   | 0.3%   |
| 23  | GUAYATÁ            | 1296     | 4722  | 1117     | 2283  | -1.1%  | -5.1%  |
| 24  | CHIVOR             | 482      | 1644  | 681      | 1798  | 2.5%   | 0.6%   |
| 25  | SANTA MARÍA        | 2473     | 2025  | 2107     | 1452  | -1.1%  | -2.3%  |
| 26  | SAN LUIS DE GACENO | 2045     | 4113  | 2444     | 3055  | 1.3%   | -2.1%  |
| 27  | MACANAL            | 938      | 3673  | 1134     | 3842  | 1.4%   | 0.3%   |
|     | AQUITANIA          |          | 10343 | -        | 9600  | -      | -0.5%  |
|     | BARRANCA DE UPÍA   |          | 930   | -        | 2015  | -      | 5.7%   |
|     | CABUYARO           |          | 2190  | -        | 3069  | -      | 2.4%   |
|     | CHOCONTÁ           |          | 10060 | -        | 10014 | -      | -0.03% |
|     | CUCAITA            |          | 2897  | -        | 2268  | -      | -1.7%  |
|     | GACHALA            |          | 3887  | -        | 2890  | -      | -2.1%  |
|     | GACHETÁ            |          | 7013  | -        | 5037  | -      | -2.3%  |
|     | JUNÍN              |          | 7311  | -        | 4990  | -      | -2.7%  |

| No. | MUNICIPIO   | AÑO 2005 |       | AÑO 2018 |       | TASA   |       |
|-----|-------------|----------|-------|----------|-------|--------|-------|
|     |             | URBANA   | RURAL | URBANA   | RURAL | URBANA | RURAL |
|     | MACHETA     |          | 5248  | -        | 4540  | -      | -1.0% |
|     | MANTA       |          | 3350  | -        | 2747  | -      | -1.4% |
|     | MIRAFLORES  |          | 4724  | -        | 3577  | -      | -2.0% |
|     | MONTERREY   |          | 1410  | -        | 5359  | -      | 10.0% |
|     | PÁEZ        |          | 2107  | -        | 1930  | -      | -0.6% |
|     | PARATEBUENO |          | 5200  | -        | 4873  | -      | -0.5% |
|     | PESCA       |          | 7060  | -        | 4607  | -      | -3.0% |
|     | RONDÓN      |          | 2433  | -        | 1807  | -      | -2.1% |
|     | SABANALARGA |          | 5540  | -        | 6077  | -      | 0.7%  |
|     | SAMACÁ      |          | 12543 | -        | 11223 | -      | -0.8% |
|     | SAN EDUARDO |          | 1152  | -        | 969   | -      | -1.2% |
|     | SORACÁ      |          | 5083  | -        | 4493  | -      | -0.9% |
|     | TUNJA       |          | 7281  | -        | 8654  | -      | 1.2%  |
|     | TIBIRITA    |          | 4963  | -        | 2638  | -      | -4.4% |
|     | UBALÁ       |          | 10337 | -        | 6285  | -      | -3.5% |
|     | VILLANUEVA  |          | 1940  | -        | 3008  | -      | 3.2%  |
|     | VILLAPINZÓN |          | 10967 | -        | 10814 | -      | -0.1% |
|     | ZETAQUIRA   |          | 4009  | -        | 3466  | -      | -1.0% |

En el caso de los demás usos de demanda de agua, se asumió una demanda constante a lo largo del periodo futuro simulado, ya que no se contaba con información sistematizada histórica de las concesiones o reglamentaciones que representarían una tendencia a futuro.

---

## 4. Metodología para la construcción de Indicadores

### Hídricos Regionales

En el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral de Recurso hídrico en Colombia se han establecido un conjunto de indicadores que apoyen la toma de decisiones mediante una Evaluación Regional del Agua (ERA). Estos indicadores presentan componentes de oferta hídrica, de presión por uso del agua, de estado de la calidad de agua y presión por contaminación, y de riesgo relacionado con la vulnerabilidad. (IDEAM, 2013)

#### 4.1. Indicadores del Sistema Hídrico Natural

##### 4.1.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica [IRH]

*“Este índice mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan como de menor regulación” (IDEAM, 2013a).*

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Donde el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) se determina considerando tanto el Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales diarios ( $V_p$ ) y el Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de

caudales diarios ( $V_t$ ). Los valores pueden ser clasificados como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Categorías para la evaluación del IRH

| Rango de valores | Categoría | Características   |
|------------------|-----------|---|
| > 0.85           | Muy alta  | Capacidad muy alta de la cuenca para retener y regular agua |
| 0.75 – 0.85      | Alta      | Capacidad alta de la cuenca para retener y regular agua     |
| 0.65 – 0.75      | Moderada  | Capacidad moderada de la cuenca para retener y regular agua |
| 0.50 – 0.65      | Baja      | Capacidad baja de la cuenca para retener y regular agua     |
| < 0.50           | Muy baja  | Capacidad muy baja de la cuenca para retener y regular agua |

#### 4.1.2. Índice de Aridez [IA]

*“Es una característica cualitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región. Identifica áreas deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial. Integra el conjunto de indicadores definidos en el ENA 2010” (IDEAM, 2013a).*

$$I_a = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

Donde el Índice de Aridez (adimensional) se determina considerando la Evapotranspiración potencial-ETP (mm) y la Evapotranspiración Real-ETR (mm). Los valores pueden ser clasificados como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Categorías para la evaluación del IA

| Rango de valores | Categoría | Características                |
|------------------|-----------|--------------------------------|
| > 0.60           |           | Altamente deficitario de agua  |
| 0.50 – 0.60      |           | Deficitario de agua            |
| 0.40 – 0.50      |           | Moderado a deficitario de agua |
| 0.30 – 0.40      |           | Moderado                       |
| 0.20 – 0.30      |           | Moderado a excedentes de agua  |
| 0.15 – 0.20      |           | Excedentes de agua             |
| < 0.15           |           | Altos excedentes de agua       |

#### 4.1.3. Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Agua Subterránea [IVICAS]

El indicador IVICAS busca establecer el nivel de susceptibilidad de un acuífero o sistema acuífero a ser contaminado en función de sus características intrínsecas (IDEAM, 2013). En este sentido, este indicador se obtuvo siguiendo la propuesta metodológica desarrollada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial para Colombia (Vargas Quintero, 2010). En esta guía se presentan diferentes metodologías paramétricas (de superposición e índices) para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos que en general envuelven tres factores principales: capacidad de atenuación de la carga contaminante en el perfil del suelo, la resistencia o inaccesibilidad en sentido hidráulico a la penetración de los contaminantes, y factores externos que puedan facilitar o retardar el impacto de las cargas contaminantes.

De acuerdo con la información disponible (número de datos, densidad de información y calidad de datos) se aplicó el método empírico GOD; el cual “es

*considerado ser un método sencillo que requiere pocos parámetros y es aplicable a escala regional en áreas de trabajo con condiciones de escasa información” (Vargas Quintero, 2010:30).*

La metodología GOD considera tres parámetros. El primero: Incidencia del agua subterránea (G), que representa el grado de confinamiento hidráulico del acuífero. La calificación de este parámetro varía entre 0, para la ausencia de acuíferos; y 1, para la presencia de un acuífero libre o freático; pasando por acuíferos artesianos, confinados y semiconfinados. El segundo: Clase general del acuífero (O), que representa la litología general de la zona insaturada. Su calificación más baja (0.4) corresponde a materiales no consolidados, mientras que la más alta (0.9-1.0) corresponde a rocas compactadas fracturadas o carstificadas. La tercera: Profundidad del agua subterránea (D), que está definida por el nivel (estático o freático) del agua subterránea. Su puntuación más baja (0.6) pertenece a acuíferos con profundidades superiores a 50m, mientras que las más altas (1.0) pertenecen a acuíferos con profundidades inferiores a 5m, o que se encuentran en medios fracturados. Mayor detalle para la calificación de estos tres parámetros mediante el método GOD, se puede encontrar en Vargas Quintero, (2010).

Una vez asignada la calificación a cada uno de los tres parámetros de este método, la vulnerabilidad puede ser calculados multiplicando estos parámetros entre sí, como lo muestra la siguiente expresión:

$$IV_{GOD} = GxOxD$$

El Indicador de Vulnerabilidad ( $IV_{GOD}$ ) puede variar entre 0 y 1, clasificándose entre cinco posibles categorías para cada unidad hidrogeológica. La Tabla 9 ilustra las clases y su significado práctico.

Tabla 9. Categorías de vulnerabilidad para el método GOD

| Rango de valores | Categoría    | Características   |
|------------------|--------------|---|
| 0.7 - 1.0        | Extrema      | Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación   |
| 0.5 – 0.7        | Alta         | Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación |
| 0.3 – 0.5        | Moderada     | Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados   |
| 0.1 – 0.3        | Baja         | Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo                 |
| < 0.1            | Despreciable | Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante   |

Fuente: Vargas Quintero (2010)

## 4.2. Indicadores de Presión por Uso del Agua

### 4.2.1. Índice de Uso de Agua Superficial [IUA]

“Representa la presión por el uso sobre la oferta hídrica disponible superficial”(IDEAM, 2013a).

$$IUA = \frac{Dh}{OHRD} * 100$$

Donde el Índice de uso de agua (%) se determina considerando el Volumen de agua extraída para usos sectoriales en un período determinado- Dh (Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>) y la oferta hídrica superficial regional disponible- OHRD (Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>). La oferta de agua en general es estimada para condiciones normales o promedio (año hidrológico medio) y de año hidrológico seco (OHMD). Los valores pueden ser clasificados como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Categorías para la evaluación del IUA

| Rango de valores | Categoría | Características  |
|------------------|-----------|--|
| >100             | Crítico   | La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible                    |
| > 50             | Muy Alto  | La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible                 |
| 20 – 50          | Alto      | La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible                     |
| 10 – 20          | Moderado  | La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible                 |
| 1 – 10           | Bajo      | La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible                     |
| ≤ 1              | Muy Bajo  | La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible |

#### 4.2.2. Índice de Uso de Extracción de Agua Subterránea [IEAS]

“Este indicador permite reconocer a nivel anual la intensidad de uso que se hace de la oferta renovable de aguas subterráneas” (IDEAM, 2013a).

$$IEAS = \frac{Q_{Ext}}{Rcg} * 100$$

Donde el Índice de extracción de agua subterránea (%) se determina considerando la extracción total del agua subterránea en un período

determinado-  $Q_{ext}$  ( $Mm^3 \text{ año}^{-1}$ ) y la oferta renovable subterránea regional (Recarga) ( $Mm^3 \text{ año}^{-1}$ ). Los valores pueden ser clasificados como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Categorías para la evaluación del IEAS

| Rango de valores | Categoría | Características  |
|------------------|-----------|--|
| >100             | Crítico   | La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible                    |
| > 50             | Muy Alto  | La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible                 |
| 20 – 50          | Alto      | La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible                     |
| 10 – 20          | Moderado  | La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible                 |
| 1 – 10           | Bajo      | La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible                     |
| $\leq 1$         | Muy Bajo  | La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible |

#### 4.2.3. Índice de Agua Subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes [IASAP]

“Este indicador permite reconocer el uso que se hace del agua subterránea para abastecimiento público per cápita” (IDEAM, 2013a).

$$IASAP = \frac{Q_{Ext-abastecimiento\ público}}{Número\ habitantes}$$

Donde el Índice de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes ( $Mm^3 \text{ año}^{-1} \text{ pob}^{-1}$ ) se determina considerando el agua subterránea extraída para uso doméstico en un período determinado-  $Q_{ext-abastecimiento\ público}$  ( $Mm^3 \text{ año}^{-1}$ ) y el número de habitantes de esa población

beneficiada (pob). Los valores pueden ser clasificados como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Categorías para la evaluación del IASAP

| Rango de valores | Categoría | Características  |
|------------------|-----------|--|
| >100             | Crítico   | La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible                    |
| > 50             | Muy Alto  | La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible                 |
| 20 – 50          | Alto      | La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible                     |
| 10 – 20          | Moderado  | La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible                 |
| 1 – 10           | Bajo      | La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible                     |
| ≤ 1              | Muy Bajo  | La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible |

#### 4.2.4. Índice Integral de Uso de Agua [IIUA]

“Este indicador permite determinar la presión por uso en relación con la oferta disponible de aguas superficiales y la oferta renovable de aguas subterráneas” (IDEAM, 2013a).

$$IIUA = \frac{D}{O_{rg} + O_d} * 100$$

Donde el Índice Integral de uso de agua (%) se determina considerando la Demanda sectorial total (D) y la Oferta renovable de aguas subterráneas ( $O_{rg}$ ) y la Oferta superficial de agua disponible ( $O_d$ ) para el mismo tiempo de referencia. Los valores pueden ser clasificados como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Categorías para la evaluación del IIUA

| Rango de valores | Categoría | Características  |
|------------------|-----------|--|
| >100             | Crítico   | La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible                    |
| > 50             | Muy Alto  | La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible                 |
| 20 – 50          | Alto      | La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible                     |
| 10 – 20          | Moderado  | La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible                 |
| 1 – 10           | Bajo      | La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible                     |
| ≤ 1              | Muy Bajo  | La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible |

### 4.3. Indicadores de la Calidad de Agua y Presión por Contaminación

#### 4.3.1. Índice de Calidad del Agua [ICA]

El índice de calidad de agua permite determinar el estado actual del recurso respecto a su calidad, teniendo en cuenta determinantes convencionales. Para el cálculo de este indicador se usan dos aproximaciones: la primera definida por el IDEAM (IDEAM, 2013a), usando siete parámetros de calidad de agua fisicoquímicos y microbiológicos, relacionados con actividades domésticas, agrícolas y pecuarias; y la segunda usando la metodología adoptada por la Corporación, donde se usan 11 parámetros convencionales fisicoquímicos y bacteriológicos para su cálculo.

El Índice de calidad de agua se calcula a partir de las funciones de transformación de las mediciones de calidad de agua, que permiten obtener valores entre 0 y 1. Una vez los parámetros se encuentran en la misma escala, se calcula un promedio asignando pesos de acuerdo con el interés del parámetro. Para ello se usa la fórmula

$$ICA = \left( \sum_{i=1}^n W_i * I_{ij} \right)$$

Donde,  $ICA$  = Índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en el punto de monitoreo de la calidad del agua.  $W_i$  = ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad  $i$ .  $I_i$  = Indicador de la variable  $i$  (obtenido de aplicar la función de transformación correspondiente).

En la Tabla 14, se presentan las funciones de transformación para cada uno de los determinantes de calidad de agua que se incluyen en el cálculo del ICA de acuerdo con la metodología del IDEAM. Estos valores son ponderados usando el Peso definido en la misma tabla. Usando los rangos definidos en la Tabla 15 se obtiene la calificación de la calidad de agua para cada punto de monitoreo en cada momento de medición.

Los rangos de transformación usados en el método implementado por Corpochivor en su jurisdicción, para evaluar la calidad de agua en sus cuerpos hídricos, se presentan en la Tabla 16. En este índice se usan 11 determinantes de calidad de agua y se asignan rangos y transformaciones para cada parámetro. Los rangos usados en este índice se presentan en la Tabla 17.

La calidad de agua de las fuentes monitoreadas será evaluada usando estos dos indicadores.

*Tabla 14. Parámetros de calidad de agua incluidos en el ICA y su función de transformación*

| Variable         | Unid         | Peso | Ecuación  |
|------------------|--------------|------|---|
| Oxígeno Disuelto | % Saturación | 0.16 | $PS_{OD} = \frac{Ox * 100}{Cp}$ PSod: Porcentaje de saturación de Od<br>$I_{od} = 1 - (1 - 0.01 * PS_{od})$                               |
| SST              | mg/l         | 0.14 | $I_{sst} = 1 - (0.02 + 0.003 * SST)$ Si SST<4.5 entonces Isst=1<br>Si SST>320 entonces Isst=0   |
| DQO              | mg/l         | 0.14 | Si DQO<20, entonces Idqo=0.91<br>Si 20<DQO<25 entonces Idqo=0.71<br>Si 25<DQO<40, entonces Idqo=0.51<br>Si 40<DQO<80, entonces, Idqo=0.26 |

| Variable                | Unid             | Peso | Ecuación  |
|-------------------------|------------------|------|---|
|                         |                  |      | Si DQO>80, entonces $I_{dqo}=0.125$   |
| Conductividad eléctrica | $\mu\text{S/cm}$ | 0.14 | $I_{CE} = 1 - 10^{(-3.26+1.34 \log 10ce)}$<br>Si $I_{CE}<0$ entonces $I_{CE}=0$   |
| Relación N/T            | (mg/l)/(mg/l)    | 0.14 | Si $15<NT/PT<20$ , entonces $I_{NT/PT}=0.8$<br>Si $10<NT/PT<15$ , entonces $I_{NT/PT}=0.6$<br>Si $5<NT/PT<10$ , entonces $I_{NT/PT}=0.35$<br>Si $NT/PT<5$ O $NT/PT>20$ , entonces $I_{NT/PT}=0.15$    |
| pH                      | Unidades de pH   | 0.14 | Si $pH <4$ entonces $I_{pH}=0.1$<br>Si $4<pH<7$<br>$I_{pH} = 0.02628419 * e^{pH*0.520025}$<br>Si $7<pH<8$ $I_{pH}=1$<br>Si $8<pH<11$<br>$I_{pH} = e^{[(pH-8)-05187742]}$<br>Si $P >11$ . $I_{pH}=0.1$ |
| Coliformes Totales      | NMP/100ml        | 0.14 | Si $E.coli<50$ , entonces $I_{e-coli}=0.98$<br>Si $50<E.coli<1600$ , entonces $I_{e-coli}=0.98 * e^{(E-coli-50)*-0.00094}$  |

Tabla 15. Categorías para la evaluación del ICA

| Rango de Valores IUA | Categoría | Características                                      |
|----------------------|-----------|--|
| 0-0.25               | Muy mala  | La calidad del agua del río en el punto es muy mala  |
| 0.26-0.5             | Mala      | La calidad del agua del río en el punto es mala      |
| 0.51-0.7             | Regular   | La calidad del agua del río en el punto es regular   |
| 0.71-0.9             | Buena     | La calidad del agua del río en el punto es buena     |
| 0.91-1.0             | Muy buena | La calidad del agua del río en el punto es muy buena |

Tabla 16. Funciones de transformación de parámetros de calidad de agua de acuerdo con rangos para la determinación del ICA.  
Metodología Corpochivor

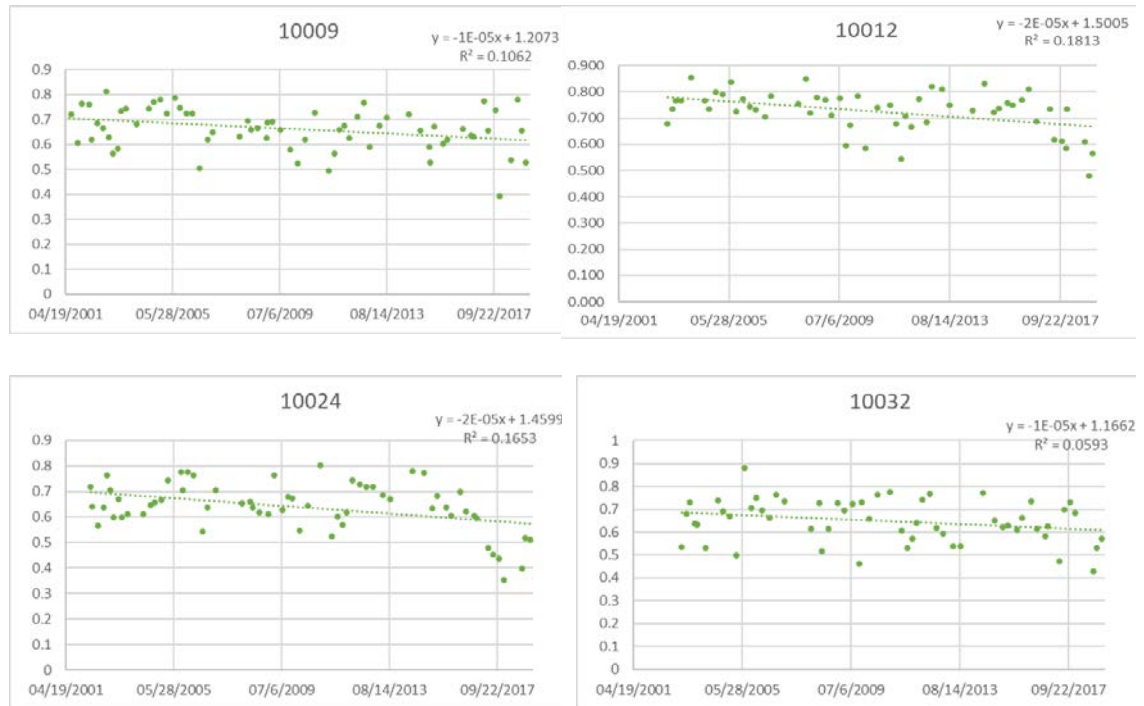
| VALOR Ci | OD   | K     | Turb | pH  | T    | NO3      | SO4 | Cl   | DBO  | ST   | COLIFORMES<br>TOTALES |       |      |
|----------|------|-------|------|-----|------|----------|-----|------|------|------|-----------------------|-------|------|
|          | mg/l | ms/cm | NTU  |     |      | unidades | °C  | mg/l | mg/l | mg/l |                       | mg/l  | mg/l |
| 0        | 0    | 16    | 500  | 1   | 14   | 50       | -8  | 100  | 250  | 90   | 15                    | 10000 | 4500 |
| 10       | 1    | 12    | 400  | 2   | 13   | 45       | -6  | 50   | 200  | 75   | 12                    | 5000  | 4000 |
| 20       | 2    | 8     | 300  | 2.5 | 12   | 40       | -4  | 20   | 150  | 60   | 10                    | 3000  | 3500 |
| 30       | 3    | 5     | 200  | 3   | 11   | 36       | -2  | 15   | 100  | 45   | 8                     | 2000  | 3000 |
| 40       | 3.5  | 3     | 150  | 3.5 | 10.5 | 32       | 0   | 10   | 60   | 30   | 6                     | 1500  | 2500 |
| 50       | 4    | 2.5   | 100  | 4   | 10   | 30       | 5   | 8    | 50   | 20   | 5                     | 1000  | 2000 |
| 60       | 5    | 2     | 80   | 4.5 | 9.5  | 28       | 10  | 6    | 40   | 15   | 4                     | 750   | 1500 |
| 70       | 6    | 1.5   | 60   | 5   | 9    | 26       | 12  | 4    | 30   | 10   | 3                     | 500   | 1000 |
| 80       | 6.5  | 1.25  | 40   | 5.5 | 8.5  | 24       | 14  | 2    | 20   | 5    | 2                     | 250   | 500  |
| 90       | 7    | 1     | 20   | 6   | 8    | 22       | 15  | 1    | 10   | 2    | 1                     | 100   | 100  |
| 100      | 7.5  | 0     | 0    | 6.5 | 7.5  | 21       | 16  | 0    | 0    | 0    | 0.5                   | 0     | 0    |
| VALOR Pi | 4    | 3     | 2    | 1   | 1    | 1        | 2   | 1    | 1    | 1    | 3                     | 2     | 2    |

Tabla 17. Rangos ICA Corpochivor

| Intervalo ICA | Interpretación  |
|---------------|---|
| 0.81 – 1      | Cuerpo de agua con niveles de calidad aceptables        |
| 0.51 – 0.80   | Corrientes con indicios de contaminación                |
| 0.21- 0.50    | Estado de contaminación que requiere atención inmediata |
| 0.2           | Ecosistema fuertemente contaminado                      |

### Tendencia del ICA IDEAM.

La Corporación Corpochivor cuenta con una base de datos de calidad de agua desde el año 2001 que permite analizar las tendencias de la calidad usando el cálculo del ICA. Para ello, se obtuvieron las líneas de tendencia en los 38 puntos que tienen muestreos desde el año 2001 y algunos desde 2014. En la Figura 26 puede observarse unos ejemplos de las tendencias encontradas y en la Tabla 18 se presentan la tendencia de la calidad de agua en cada estación.



**Figura 26. Tendencia del ICA.**

Tabla 18. Tendencias de calidad de agua en 38 puntos de monitoreo.

| Estación | R2     | m         | Tendencia |
|----------|--------|-----------|-----------|
| 10001    | 0.0407 | -0.000008 | ↓ -1      |
| 10002    | 0.0653 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10003    | 0.005  | -0.000002 | → 0       |
| 10004    | 0.0006 | -0.000001 | → 0       |
| 10005    | 0.0887 | -0.00004  | ↓ -1      |
| 10006    | 0.0257 | -0.000006 | ↓ -1      |
| 10007    | 0.0851 | -0.00004  | ↓ -1      |
| 10008    | 0.0534 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10009    | 0.1062 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10010    | 0.0942 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10011    | 0.0805 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10012    | 0.1813 | -0.00002  | ↓ -1      |
| 10013    | 0.0248 | 0.000006  | ↑ 1       |
| 10014    | 0.1476 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10015    | 0.1788 | -0.000006 | ↓ -1      |
| 10016    | 0.0897 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10017    | 0.1299 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10018    | 0.2019 | -0.00002  | ↓ -1      |
| 10019    | 0.0017 | -0.000002 | → 0       |
| 10020    | 0.0543 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10021    | 0.0473 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10022    | 0.1147 | -0.00002  | ↓ -1      |
| 10023    | 0.0728 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10024    | 0.1653 | -0.00002  | ↓ -1      |
| 10025    | 0.1609 | -0.00002  | ↓ -1      |
| 10026    | 0.046  | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10027    | 0.0087 | -0.000004 | → 0       |
| 10028    | 0.0002 | 0.000006  | → 0       |
| 10029    | 0.0828 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10030    | 0.0439 | -0.000009 | ↓ -1      |
| 10031    | 0.1098 | -0.00002  | ↓ -1      |
| 10032    | 0.0593 | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10033    | 0.1527 | -0.00002  | ↓ -1      |
| 10034    | 0.37   | -0.00001  | ↓ -1      |
| 10038    | 0.4073 | -0.0001   | ↓ -1      |

### **4.3.2. Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua [IACAL]**

El Índice de Alteración potencial de la calidad de agua IACAL busca establecer el potencial de contaminación regional y alteración potencial, de acuerdo con las actividades antrópicas que se vienen adelantando en cada microcuenca. Para ello, se utiliza la información obtenida de demandas potenciales por sector agrícola y pecuario y las concesiones del sector doméstico rural y urbano, minería e industria. El cálculo se realiza a nivel de microcuenca de acuerdo con el tipo de uso del agua.

La carga total se obtiene sumando las cargas para los diferentes usos en cada microcuenca y dividiendo por el caudal de salida en cada microcuenca para año medio y seco. A continuación se detalla cómo se calcula la carga de por tipo de usuario.

#### **Estimación de cargas para uso doméstico.**

La carga de cada determinante de calidad de agua *i.e.* DBO, DQO, NT, PT y SST, se calcula de forma diferenciada para poblaciones urbanas y rurales. Para ello se usan factores de carga por habitante al año, calculadas en estudios anteriores en el área de estudio (JAM Ingeniería y Medio Ambiente SAS. , 2018). Estos factores se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Factores para calcular cargas Aguas Residuales domésticas urbanas y rurales

| ARD domestica                                | DBO (Kg/Año-Persona) | DQO (Kg/Año-Persona) | Nitrógeno Total (Kg/Año-Persona) | Fósforo Total (Kg/Año-Persona) | Sólidos Suspendidos Totales (Kg/Año-Persona) |
|--|----------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|--|
| <b>Conectado a sistema de alcantarillado</b> | 18.1                 | 28.29                | 3.25                             | 1.37                           | 10.04  |
| <b>Conectado a pozo séptico</b>              | 6.9                  | 10.81                | 1.24                             | 0.52                           | 3.83   |

Fuente: ERA Subcuencas Teatinos, Juyasía y Tibana. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente

SAS. , 2018)

Cada uno de los parámetros de calidad de agua se calcula multiplicando la población urbana y rural por microcuenca por el factor y sumando el total por microcuenca.

#### Estimación de cargas de uso agrícola.

La determinación de cargas debido a actividades agrícolas se calcula a partir de las áreas de cultivos mixtos, permanentes y transitorios obtenidas por la reclasificación realizadas en WEAP y multiplicando por factores de emisión de determinantes de calidad de agua de acuerdo con la actividad realizada.

El factor de emisión por determinante de calidad de agua depende de los cultivos que se tiene en las microcuencas. Los tipos de cultivo más representativos en la cuenca se obtuvieron en el capítulo de demandas y se usan para promediar factores de emisión para cultivos permanentes, transitorios y mixtos. Los factores de emisión por tipo de cultivo se obtienen de estudios

regionales previos (JAM Ingeniería y Medio Ambiente SAS. , 2018) y los resultados se presentan en la Tabla 20.

*Tabla 20. Cargas por tipo de cultivo permanente, transitorio y mixto al año.(kg\*/ha\*año)*

| Cultivos permanente                          |     | DBO   | DQO   | NT   | PT  | SST   |
|--|-----|-------|-------|------|-----|-------|
| Cítricos                                     | 69  | 194.9 | 400.7 | 54.2 | 0.0 | 43.3  |
| Caña   | 15  | 1.4   | 2.0   | 0.0  | 0.0 | 1.4   |
| Café   | 8   | 22.3  | 46.8  | 0.5  | 0.0 | 21.5  |
| Plátano                                      | 8   | 14.6  | 33.0  | 3.2  | 0.0 | 6.3   |
| Carga final                                  | 100 | 233.2 | 482.5 | 57.9 | 0.0 | 72.5  |
|  |     |       |       |      |     |       |
| Cultivos Transitorios                        |     | DBO   | DQO   | NT   | PT  | SST   |
| Papa   | 50  | 52.4  | 270.9 | 43.7 | 0.0 | 78.7  |
| Maíz amarillo                                | 8   | 13.0  | 34.0  | 2.1  | 0.0 | 5.5   |
| Maíz blanco                                  | 8   | 5.3   | 20.8  | 1.5  | 0.0 | 4.5   |
| Cultivos de hortalizas, verduras y legumbres | 34  | 85.1  | 181.6 | 28.4 | 0.0 | 22.7  |
| Carga final                                  | 100 | 155.9 | 507.3 | 75.7 | 0.0 | 111.3 |
|  |     |       |       |      |     |       |
| Cultivos Mixtos                              |     | DBO   | DQO   | NT   | PT  | SST   |
| Cultivos permanentes                         | 50  | 233.2 | 482.5 | 57.9 | 0.0 | 72.5  |
| Cultivos transitorios                        | 50  | 155.9 | 507.3 | 75.7 | 0.0 | 111.3 |
| Carga final                                  | 100 | 194.5 | 494.9 | 66.8 | 0.0 | 91.9  |

### Estimación de cargas de uso pecuario

La estimación de cargas del sector pecuario se realiza sumando por un lado las demandas concesionadas del sector avícola y pecuario, con la carga debida al ganado que espera ocupe los pastos en cada microcuenca. Para cada uno de estos usos se utilizan los factores de emisión resumidos en la Tabla 21.

Tabla 21. Factores de emisión uso pecuario

| Act       | DBO  | DQO   | NT    | PT   | SST   |
|-----------|------|-------|-------|------|-------|
| Ganadería | 20   | 33.33 | 12.3  | 5.22 | 13.33 |
| Avícola   | 2.47 | 5.4   | 10.08 | 0.72 | 0.61  |

Fuente: ERA Subcuencas Teatinos, Juyasía y Tibana. (JAM Ingeniería y Medio Ambiente SAS. , 2018) (kg/Año Animal en Pie)

### Estimación de cargas de uso industrial y minería.

La estimación de cargas para el sector industrial y minero se realiza multiplicando el caudal definido en las concesiones para estos dos sectores, por concentraciones máximas por actividad económica desarrollada. Las concentraciones máximas se obtienen de los límites máximos de emisión de vertimientos definidos en el Decreto 631 de 2015 del MADS. Las cargas anuales se agregan por microcuenca. Las concentraciones se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Concentraciones de aguas residuales por determinante de calidad de agua para sector minería e industrial.

| Act        | DBO | DQO | NT | PT | SST |
|------------|-----|-----|----|----|-----|
| Minería    | 50  | 150 | 0  | 0  | 50  |
| Industrial | 150 | 300 | 0  | 0  | 50  |

El IDEAM ha desarrollado una reclasificación para cada determinante de calidad de agua, de tal forma que la carga sobre el caudal permita generar algunas alertas respecto a la contaminación potencial de acuerdo con las actividades que se están desarrollando en la cuenca. Esta reclasificación se presenta en la Tabla 23

Tabla 23. Reclasificación de carga/caudal para cada determinante de calidad de agua.

| Clasificación | DBO       | DQO-DBO   | NT        | PT          | SST     |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-------------|---------|
| Baja          | 0-0.14    | 0-0.14    | 0-0.03    | 0-0.005     | 0-0.4   |
| Moderada      | 0.14-0.4  | 0.14-0.36 | 0.03-0.06 | 0.005-0.014 | 0.4-0.8 |
| Media-Alta    | 0.4-1.21  | 0.36-1.17 | 0.06-1.14 | 0.014-0.036 | 0.8-1.9 |
| Alta          | 1.21-4.86 | 1.17-6.78 | 1.14-0.56 | 0.036-0.135 | 1.9-7.7 |
| Muy Alta      | >4.86     | >6.78     | >0.56     | >0.135      | >7.7    |

A partir de la reclasificación de los determinantes de calidad de agua se obtiene el índice IACAL, aplicando los criterios que se resumen en la Tabla 24.

Tabla 24. Clasificación de la alteración potencial de la calidad de agua. IACAL.

| Clasificación | IACAL |     |
|---------------|-------|-----|
| Baja          | 1     | 1.5 |
| Moderada      | 1.5   | 2.5 |
| Media-Alta    | 2.5   | 3.5 |
| Alta          | 3.5   | 4.5 |
| Muy Alta      | 4.5   | 5   |

## 4.4. Indicadores de Riesgo

### 4.4.1. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico [IVH]

“Este indicador representa el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua que, ante una amenaza particular, podría generar riesgos de desabastecimiento ” (IDEAM, 2013a). Este indicador a través de una matriz que relaciona tanto el índice de uso de agua (IUA) como el Índice de regulación hídrica (IRH), como se indica a continuación en la Tabla 25

Tabla 25. Categorías para la evaluación del IVH

| Índice de uso de agua | Índice de regulación | Categoría |
|-----------------------|----------------------|-----------|
| Muy Baja              | Alta                 | Muy Baja  |
| Muy Baja              | Media                | Baja      |
| Baja                  | Alta                 | Baja      |
| Baja                  | Media                | Baja      |
| Muy Baja              | Baja                 | Media     |
| Muy Baja              | Muy Baja             | Media     |
| Baja                  | Baja                 | Media     |
| Baja                  | Muy Baja             | Media     |
| Moderada              | Alta                 | Media     |
| Moderada              | Media                | Media     |
| Alta                  | Alta                 | Media     |
| Muy Alta              | Alta                 | Media     |
| Moderada              | Baja                 | Alta      |
| Moderada              | Muy Baja             | Alta      |
| Alta                  | Media                | Alta      |
| Alta                  | Baja                 | Alta      |
| Muy Alta              | Media                | Alta      |
| Muy Alta              | Baja                 | Alta      |
| Alta                  | Muy Baja             | Muy Alta  |
| Muy Alta              | Muy Baja             | Muy Alta  |

#### 4.4.2. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales [IVET]

Este indicador evalúa el grado de susceptibilidad de las microcuencas a eventos torrenciales a través de la conjugación de un índice morfométrico de torrencialidad y el índice de variabilidad (IDEAM, 2013). El índice morfométrico de torrencialidad relaciona parámetros morfométricos de las unidades hidrológicas, tales como el coeficiente de forma, pendiente media de la microcuenca y la densidad de drenaje. Estos parámetros pueden dar una idea del nivel de escorrentía, infiltración y capacidad de arrastre de sedimentos en una unidad de análisis durante un evento de precipitación. Por su parte, el índice de variabilidad relaciona la variabilidad entre valores de caudales mínimos y máximos en una unidad hidrológica. La evaluación del índice IVET

se puede realizar a través de una matriz de decisión que relaciona categorías tanto del índice morfométrico como el índice de variabilidad, como se muestra en la siguiente Tabla 26:

Tabla 26. Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET)

| Categoría | Índice morfométrico de torrencialidad |       |       |          |          |
|-----------|---------------------------------------|-------|-------|----------|----------|
|           | Muy baja                              | Baja  | Media | Alta     | Muy alta |
| Muy baja  | Baja                                  | Baja  | Media | Alta     | Alta     |
| Baja      | Baja                                  | Media | Media | Alta     | Muy alta |
| Media     | Baja                                  | Media | Alta  | Alta     | Muy alta |
| Alta      | Media                                 | Media | Alta  | Muy alta | Muy alta |
| Muy alta  | Media                                 | Alta  | Alta  | Muy alta | Muy alta |

El índice morfométrico se desarrolla a partir de la categorización del coeficiente de compacidad, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje. Estas categorías han sido establecidas por el IDEAM, como se muestra en la Tabla 27 (IDEAM, 2013). La evaluación de cada una de las tres características permite relacionar las tres variables por cada unidad hidrológica en la matriz ilustrada en la Tabla 28.

Tabla 27. Relaciones para categorizar el índice morfométrico

| Índice morfométrico                       | Escala    | Área de la cuenca de drenaje (km <sup>2</sup> ) | Categorías                         |                             |                             |               |               |
|---|-----------|---|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
|   |           |   | 1                                  | 2                           | 3                           | 4             | 5             |
| Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> ) | 1:10.000  | <15   | <1,50                              | 1,51 – 2,00                 | 2,01 – 2,50                 | 2,51 – 3,00   | > 3           |
|   | 1:25.000  | 16 a 50   | <1,20                              | 1,21 – 1,80                 | 1,81 – 2,00                 | 2,01 – 2,50   | > 2,5         |
|   | 1:100.000 | >50   | <1,00                              | 1,01 – 1,50                 | 1,51 – 2,00                 | 2,01 – 2,50   | > 2,5         |
|   |           |   | Baja                               | Moderada                    | Moderada Alta               | Alta          | Muy Alta      |
| Pendiente media de la cuenca (%)          | 1:10.000  | <15   | <20                                | 21 – 35                     | 36 – 50                     | 51 – 75       | >75           |
|   | 1:100.000 | >50   | <15                                | 16 – 30                     | 30 – 45                     | 46 – 65       | >65           |
|   |           |   | Accidentado                        | Fuerte                      | Muy Fuerte                  | Escarpado     | Muy Escarpado |
| Coeficiente de compacidad                 |           |   | <1,625                             | 1,376 -1,500                | 1,251- 1,375                | 1,126 – 1,250 | 1,00 – 1,125  |
|   |           |   | Oval-oblonga a rectangular-oblonga | Oval-redonda a oval-oblonga | Casi redonda a oval-redonda |               |               |

Tabla 28. Relaciones entre variables para el índice morfométrico

|                     |   | Pendiente media de la cuenca |     |     |     |     |   |
|---------------------|---|------------------------------|-----|-----|-----|-----|---|
|                     |   | 1                            | 2   | 3   | 4   | 5   |   |
| Densidad de drenaje | 1 | 111                          | 121 | 131 | 141 | 151 | 1 |
|                     |   | 112                          | 122 | 132 | 142 | 152 | 2 |
|                     |   | 113                          | 123 | 133 | 143 | 153 | 3 |
|                     |   | 114                          | 124 | 134 | 144 | 154 | 4 |
|                     |   | 115                          | 125 | 135 | 145 | 155 | 5 |
|                     | 2 | 211                          | 221 | 231 | 241 | 251 | 1 |
|                     |   | 212                          | 222 | 232 | 242 | 252 | 2 |
|                     |   | 213                          | 223 | 233 | 243 | 253 | 3 |
|                     |   | 214                          | 224 | 234 | 244 | 254 | 4 |
|                     |   | 215                          | 225 | 235 | 245 | 255 | 5 |
|                     | 3 | 311                          | 321 | 331 | 341 | 351 | 1 |
|                     |   | 312                          | 322 | 332 | 342 | 352 | 2 |
|                     |   | 313                          | 323 | 333 | 343 | 353 | 3 |
|                     |   | 314                          | 324 | 334 | 344 | 354 | 4 |
|                     |   | 315                          | 325 | 335 | 345 | 355 | 5 |
|                     | 4 | 411                          | 421 | 431 | 441 | 451 | 1 |
|                     |   | 412                          | 422 | 432 | 442 | 452 | 2 |
|                     |   | 413                          | 423 | 433 | 443 | 453 | 3 |
|                     |   | 414                          | 424 | 434 | 444 | 454 | 4 |
|                     |   | 415                          | 425 | 435 | 445 | 455 | 5 |
|                     | 5 | 511                          | 521 | 531 | 541 | 551 | 1 |
|                     |   | 512                          | 522 | 532 | 542 | 552 | 2 |
|                     |   | 513                          | 523 | 533 | 543 | 553 | 3 |
|                     |   | 514                          | 524 | 534 | 544 | 554 | 4 |
|                     |   | 515                          | 525 | 535 | 545 | 555 | 5 |

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| Muy alta | Baja     | Muy baja |
| Alta     | Moderada |          |

Por otro lado, el índice de variabilidad, como se comentaba anteriormente, evalúa las diferencias existentes entre caudales máximos y mínimos en una unidad de análisis. En este sentido, las cuencas que muestran una variabilidad pequeña en los caudales son aquellas que tienden a mantener caudales y flujo por sus cauces. Este indicador se determina siguiendo la ecuación que a continuación se enseña:

$$\text{Índice de variabilidad} = \frac{\log Q_i - \log Q_f}{\log X_i - \log X_f}$$

Donde  $Q_i$  y  $Q_f$  representan dos valores de la curva de duración de caudales, y  $X_i$  y  $X_f$  los porcentajes de excedencia correspondientes a los cuales escogidos. La Tabla 29 enseña la clasificación para cada uno de los valores de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales.

*Tabla 29. Clasificación del índice de variabilidad*

| Pendiente | Vulnerabilidad |
|-----------|----------------|
| <10°      | Muy baja       |
| 10°-37°   | Baja           |
| 37°-47°   | Media          |
| 47°-55°   | Alta           |
| >55°      | Muy alta       |

## **5. Resultados de la Evaluación de Indicadores Hídricos Regionales en CORPOCHIVOR**

### **5.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica [IRH]**

La Figura 27 ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IRH presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor. Como se puede observar, 196 microcuencas se encuentran en una categoría Muy Baja, mientras 5 microcuencas caen en categoría Baja. Por lo que en general el área de interés presenta una Muy baja capacidad para retener y regular la humedad del suelo. A pesar de que existen 12 tipos diferentes de coberturas y varios tipos de usuarios no se aprecia alguna diferencia aguas arriba o aguas debajo de la capacidad de regulación de las distintas subzonas hidrográficas Guavio, Garagoa, Lengupá y Upía. Dado que la capacidad de regulación de una cuenca está relacionada con características tales como topografía, geología, suelos, vegetación y clima, se considera que el relieve (escarpado) es el factor de mayor influencia en el resultado final de este indicador.

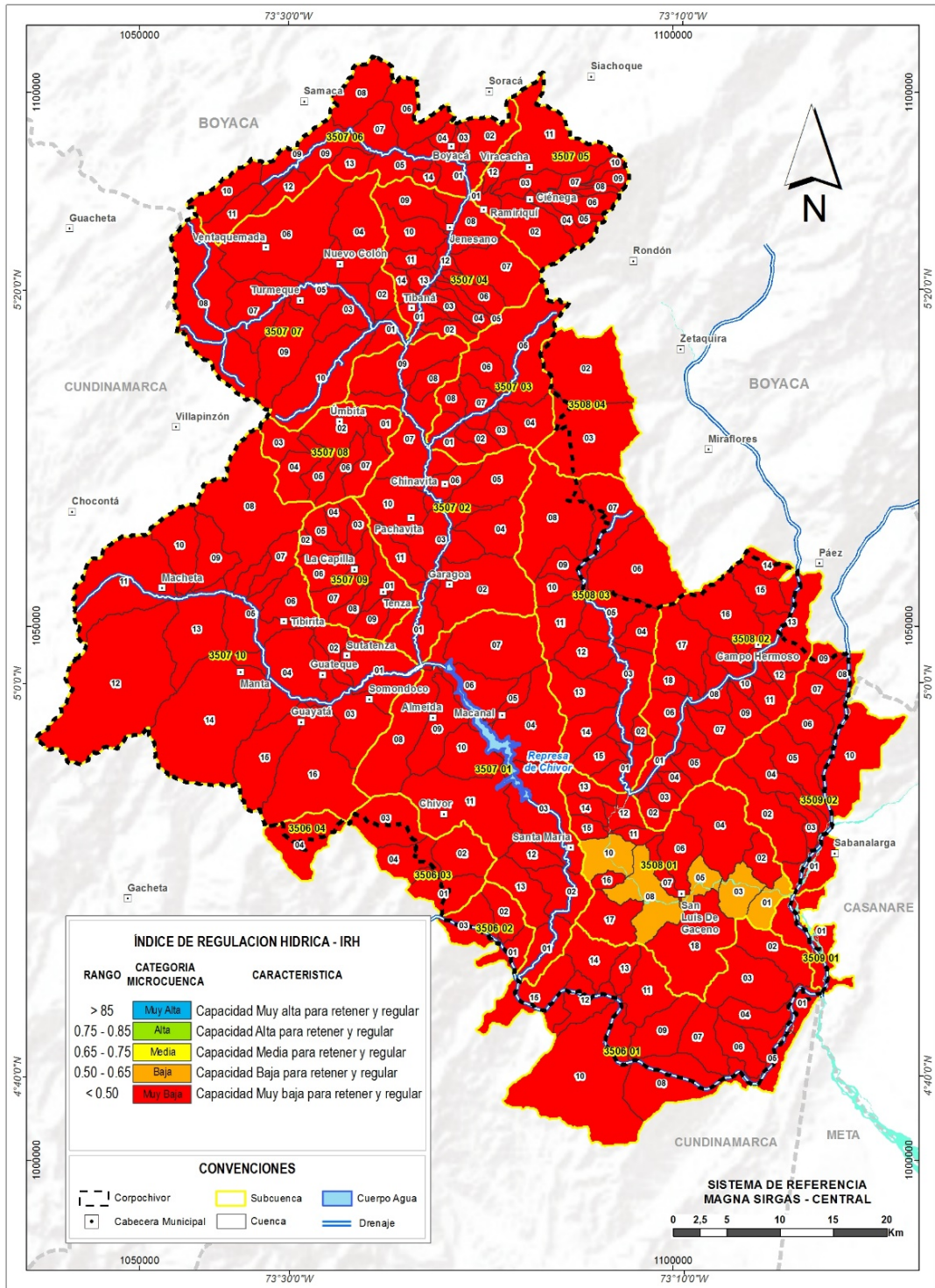


Figura 27. Índice de regulación hídrica [IRH] - año medio

## 5.2. Índice de Aridez [IA]

La Figura 28 ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IA presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor. Como se puede observar, en el área de interés se presentan varias categorías desde Deficitario (1 microcuencia), pasando por varios rangos de déficit Moderado (62 microcuencas en Moderado, 38 microcuencas en Moderado a deficitario, y 73 microcuencas en Moderado a excedentes), hasta Altos excedentes (1 microcuencia). Sin embargo, se aprecia un patrón general en el cual las unidades hidrográficas aguas arriba del Embalse El Chivor presentan mayor déficit de agua (con categorías entre Moderado y Deficitario); mientras que aquellas ubicadas en la parte inferior del embalse presentan mayor suficiencia de precipitación (con categorías entre Moderado y Altos excedentes de agua). Dado que este indicador relaciona la precipitación y la evapotranspiración, las dos zonas de insuficiencia (arriba) y suficiencia (abajo) de agua pueden estar influenciada tanto por el tipo de cobertura y la estacionalidad del clima que es distinta en ambas partes. La cobertura vegetal de la parte superior requerirá una mayor cantidad de agua para satisfacer las necesidades hídricas y, por tanto, es importante potenciar coberturas con mayor tolerancia al estrés hídrico en estas unidades hidrográficas. Asimismo, la parte superior está influenciada por la climatología bimodal del área hidrográfica del Magdalena-Cauca, mientras que la parte inferior por la climatología modal del área hidrográfica de la Orinoquia.

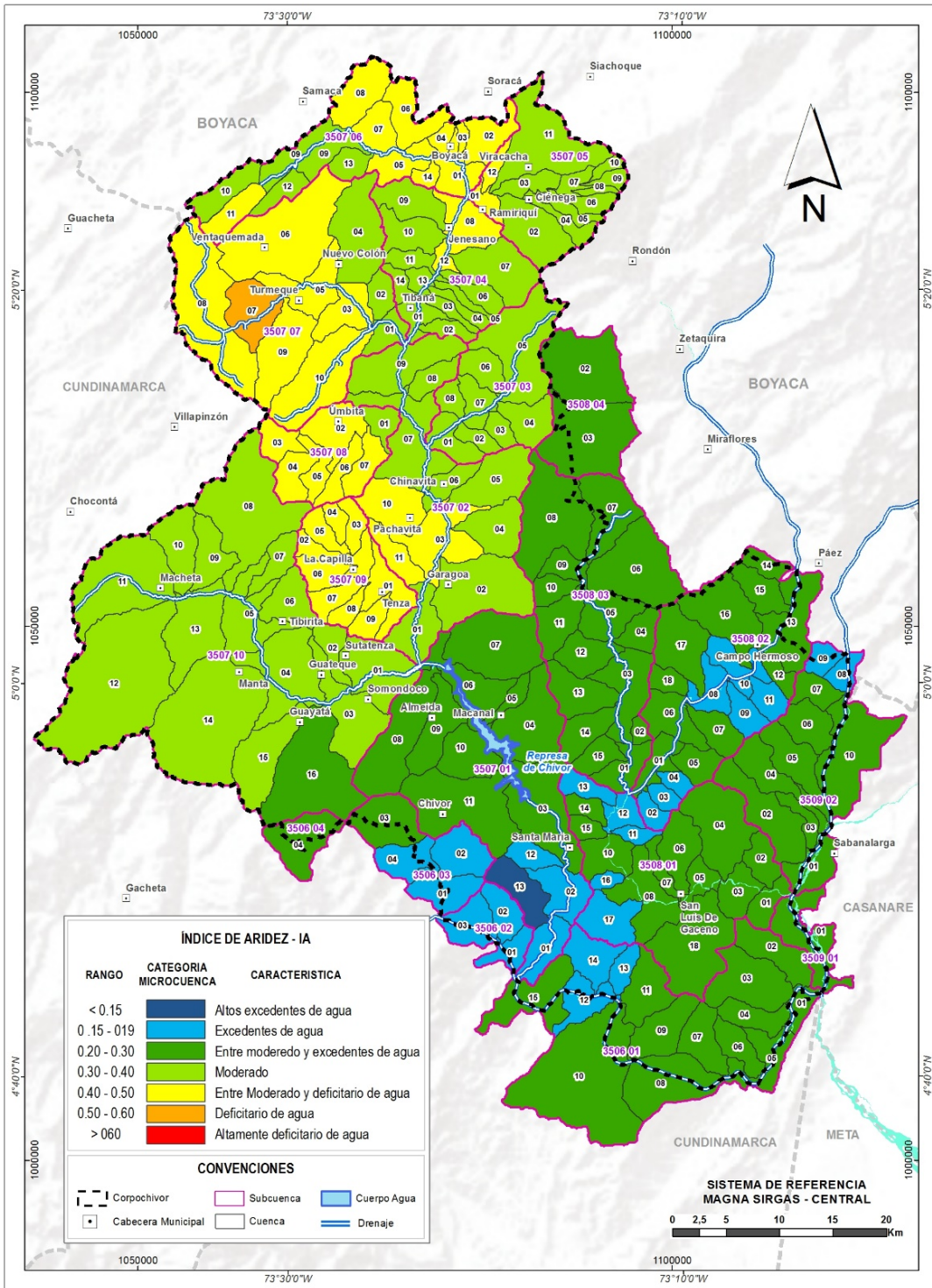


Figura 28. Índice de aridez [IA] – año medio

### **5.3. Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Agua Subterránea [IVICAS]**

De acuerdo con la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación mediante el método GOD, se obtienen tres categorías, como se indica en la Figura 29: Muy baja para Unidades C1 en la que el fluido vertical es insignificante, Baja para Unidades B en la que existe vulnerabilidad cuando los contaminantes son descargados de forma amplia y continua durante largo periodos de tiempo, y Moderada para Unidades A3 en la que existe vulnerabilidad cuando los contaminantes son continuamente descargados o existen fuentes de lixiviados. Sin embargo, esta clasificación puede estar parcializada como consecuencia de la limitada información de estratigrafía profunda y niveles de agua subterránea. Por lo que se considera necesario mejorar el conocimiento del acuífero para poder mejorar la evaluación de este indicador tanto en la subzona hidrográfica de Garagoa como en Guavio, Lengupá y Upía

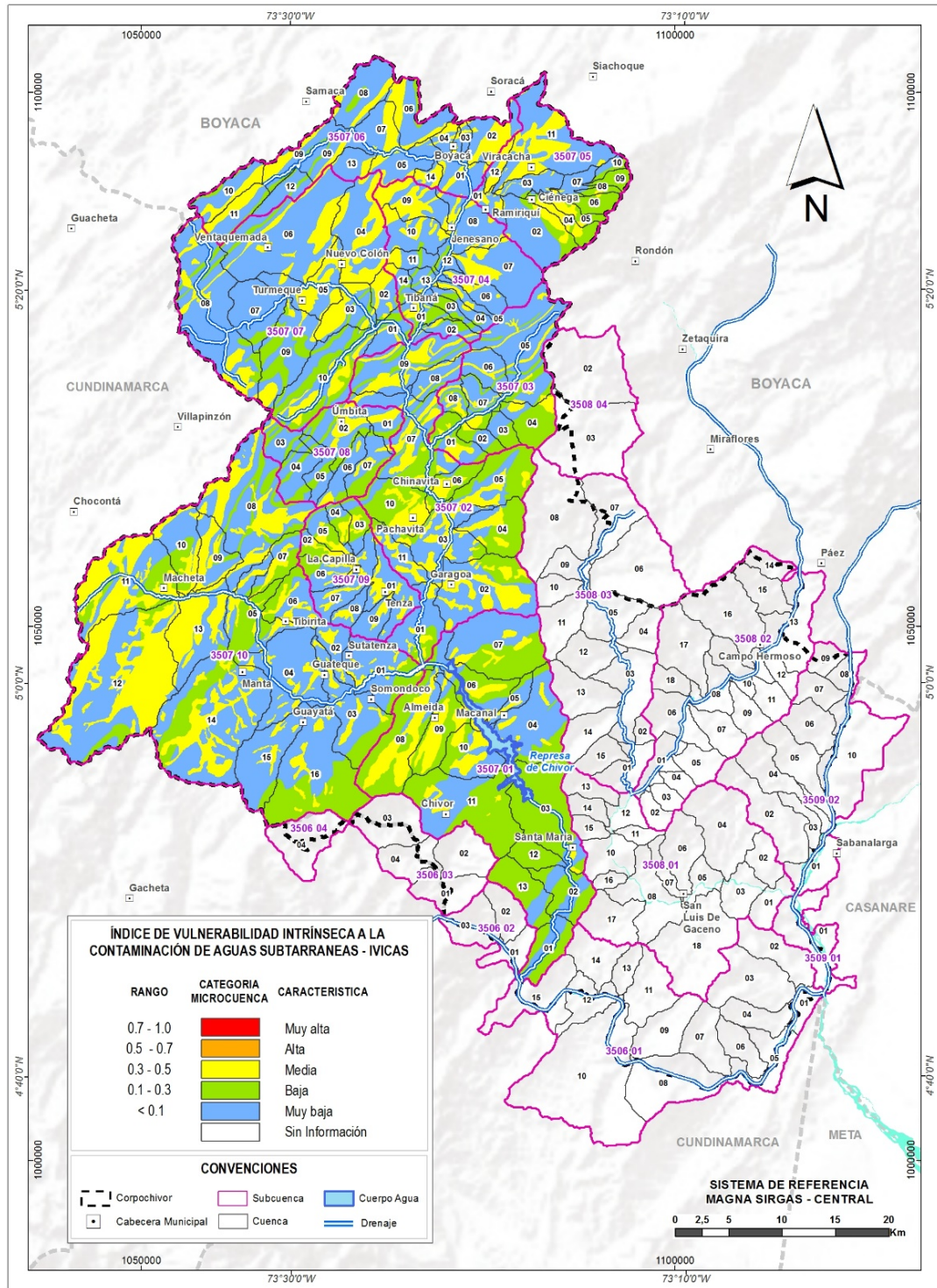


Figura 29. Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Agua Subterránea [IVICAS]

#### **5.4. Índice de Uso del Agua superficial [IUA]**

La Figura 30 ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IUA presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor. Como se puede observar, en el área de interés cerca de 100 unidades hidrográficas no cuentan con información de demanda, pero en general se presenta una presión hídrica entre Muy baja (55 microcuencas) y Baja (41 microcuencas). No obstante, algunas microcuencas ubicadas en la parte superior de la jurisdicción presentan categorías entre Moderado (2 microcuencas), Alto (2 microcuencas) y Muy alto (1 microcuenca). Anteriormente, en el índice de aridez (IA) se comentaba que las coberturas en las microcuencas aguas arriba puede existir un grado de déficit hídrico, y esto a su vez genera una demanda hídrica superficial mayor que en la parte inferior. La unidad hidrográfica 3507 08 03, ubicada en las inmediaciones de Úmbita, es la microcuenca con mayor presión (Muy alta). Esto puede ser el resultado de la alta demanda de un distrito de riego que se abastece con aguas superficiales. Sin embargo, es importante resalta que hay una cantidad importante de unidades hidrográficas sin información sobre la cantidad de agua extraída y el uso de ella.

Por su parte, la Figura 31 ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IUA presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor para condiciones hidrológicas secas. Como se observa, se mantiene la tendencia descrita anteriormente, en la cual las unidades hidrográficas ubicadas en la

parte superior del área de estudio presentan categorías con mayor presión. A causa de presentar caudales mínimos de las series de caudales medios diarios se encuentran más microcuencas en categorías Moderado (16), Alto (8), Muy alto (1) y Crítico (3). En esta oportunidad aparecen tres microcuencas 3507 05 04-06, ubicadas en las inmediaciones de Ciénaga, con categorías entre Muy alto y Crítico. Se considera importante, a partir de este estudio, empezar a una revisión de las extracciones en estas tres unidades hidrográficas, con el objetivo de anticipar futuros conflictos entre usuarios.

Por otro lado, la Figura 32 ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IUA presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor para un escenario de demanda potencial bajo condiciones hidrológicas promedio. Se observa una tendencia similar a las dos situaciones de demandas presentadas anteriormente. En este escenario la presión hídrica se observa primordialmente en las unidades hidrográficas aguas arriba del área de estudio. Aparecen más unidades hidrológicas en categorías Alto, Muy Alto y Crítico, y menos en categorías Bajo o Muy bajo. Lo anterior, puede obedecer a que en este escenario Potencial la presión hídrica está en función del tipo de cobertura de suelo, donde el pastoreo para ganado y la agricultura (permanente, transitoria o mixta) tienen un peso importante, incluso si no se tiene reportada en la unidad hidrológica alguna concesión asignada para uso y aprovechamiento del agua. Por lo tanto, se cree que la extracción hídrica superficial requerida por estos sectores en esta región puede ser superior a la informada a través de las concesiones. Así mismo se encontró que la demanda estimada para uso

domestico tiende a ser inferior en la mayoría de las unidades hidrológicas, lo que puede indicar que existe una sobreasignación de los caudales concesionados par este uso. Sin embargo, se recuerda que en este escenario potencial se usaron caudales superiores estimados o iguales asignados mediante concesiones para uso doméstico. Asimismo, durante un periodo hidrológico seco bajo este escenario potencial, las unidades hidrográficas—a causa de su cobertura agrícola y caudales mínimos históricos— presentan muchas más categorías Muy Alta y Crítica, especialmente en cuencas aportadoras y no tanto en interfluvios o intercuenas de la parte superior del área de interés (Figura 33).

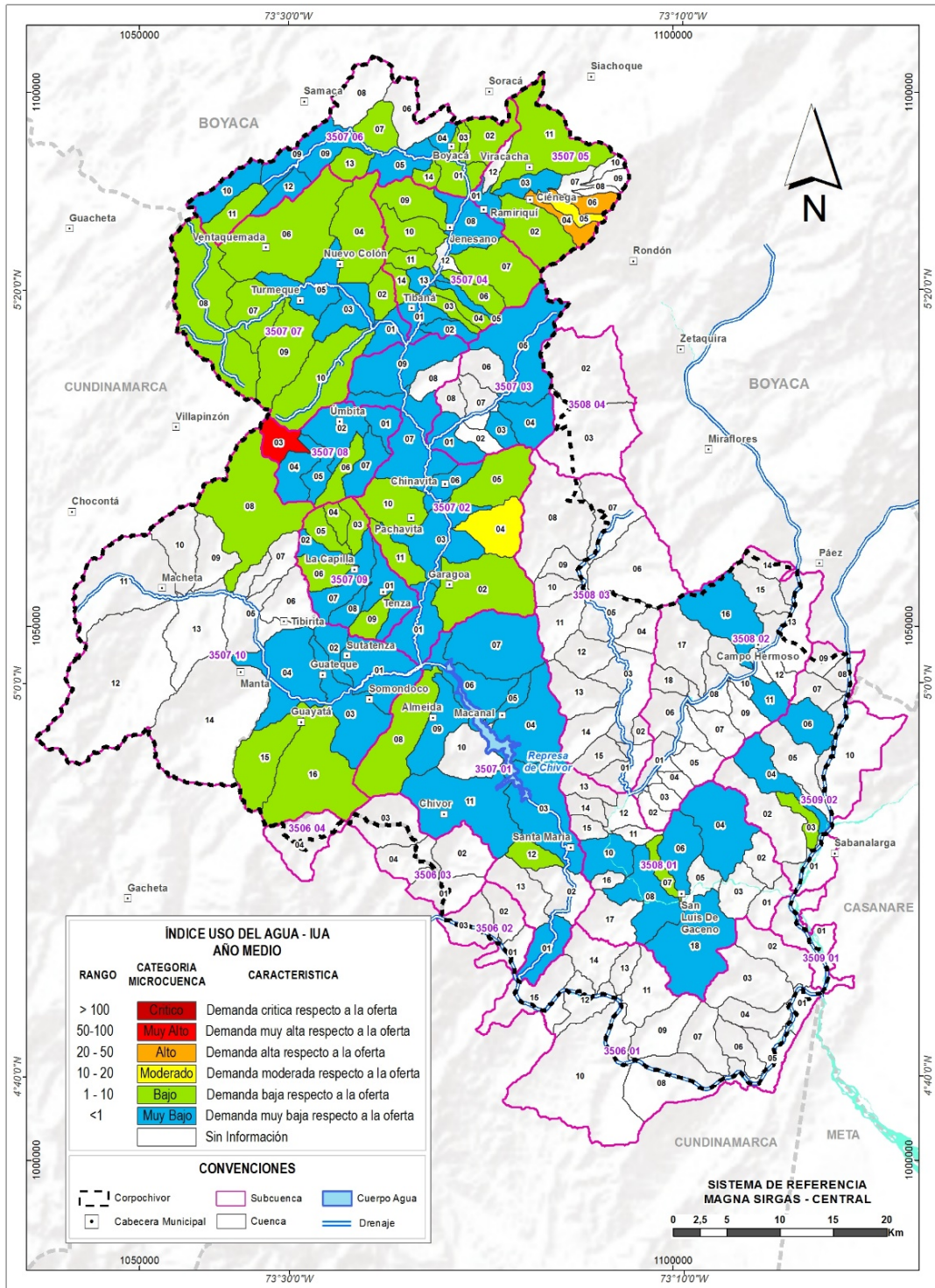


Figura 30. Índice de uso de agua [IUA] - año medio

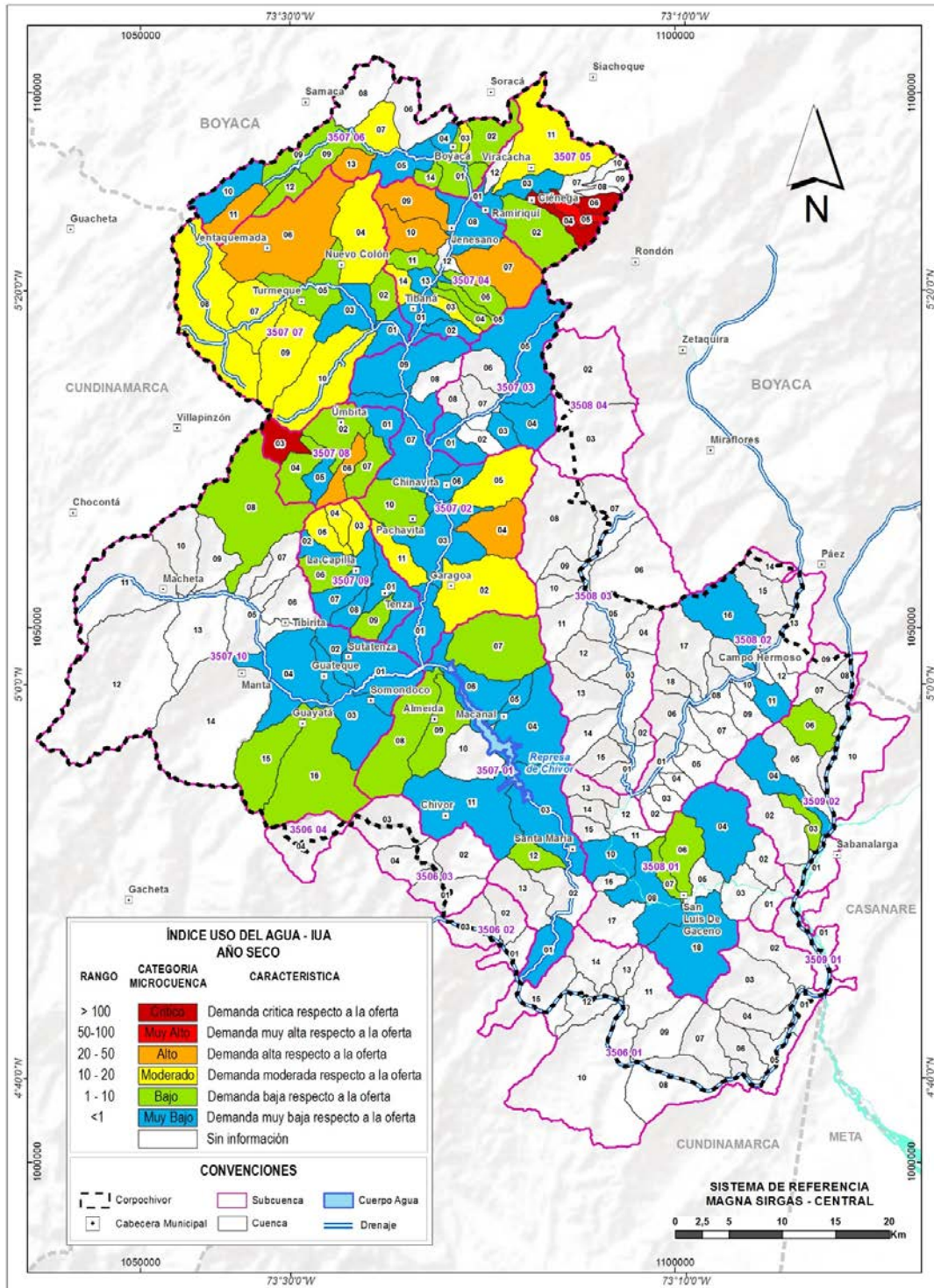


Figura 31. Índice de uso de agua [IUA] - año seco

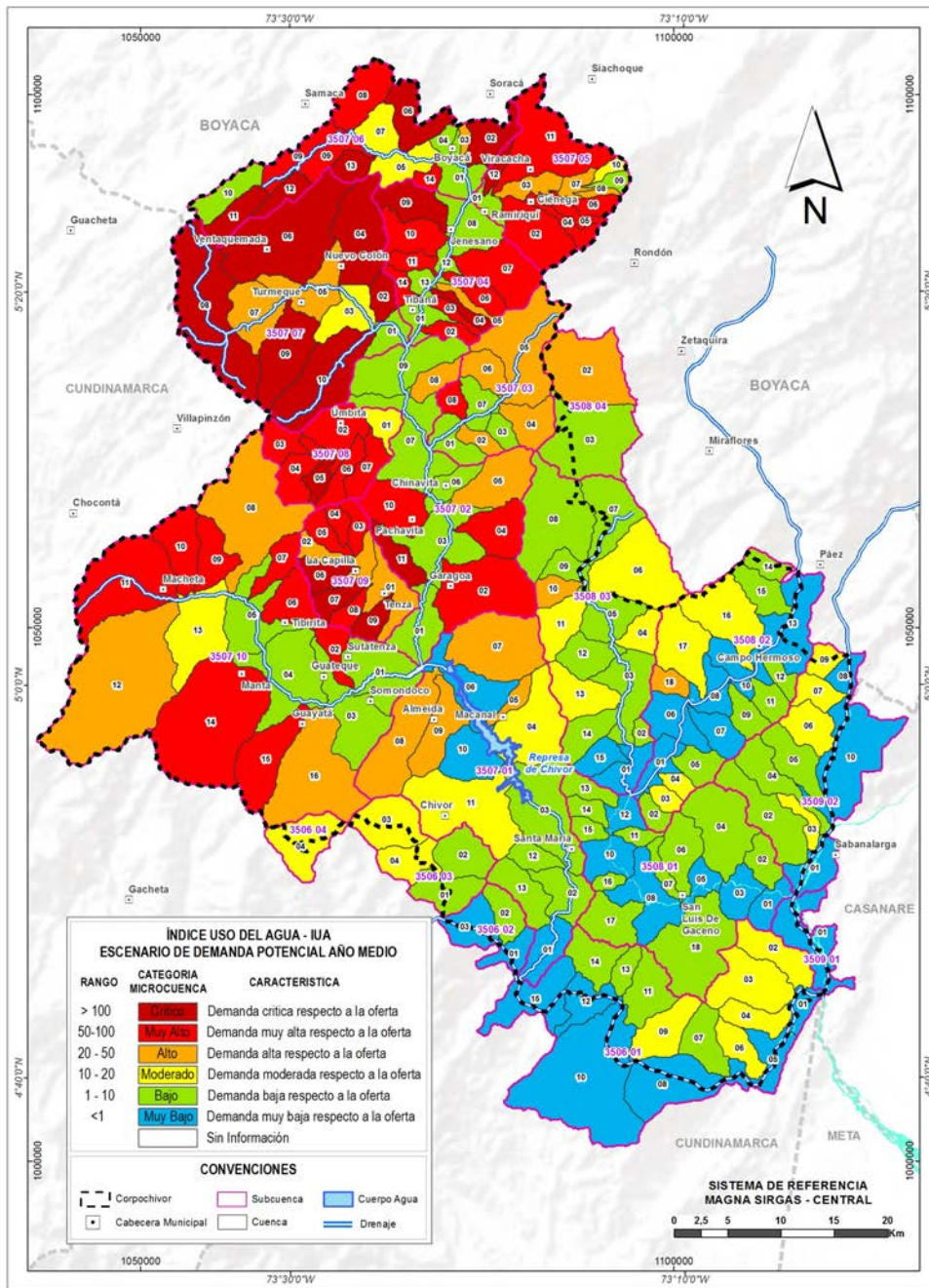


Figura 32. Índice de uso de agua [IUA] - escenario demanda potencial con año medio

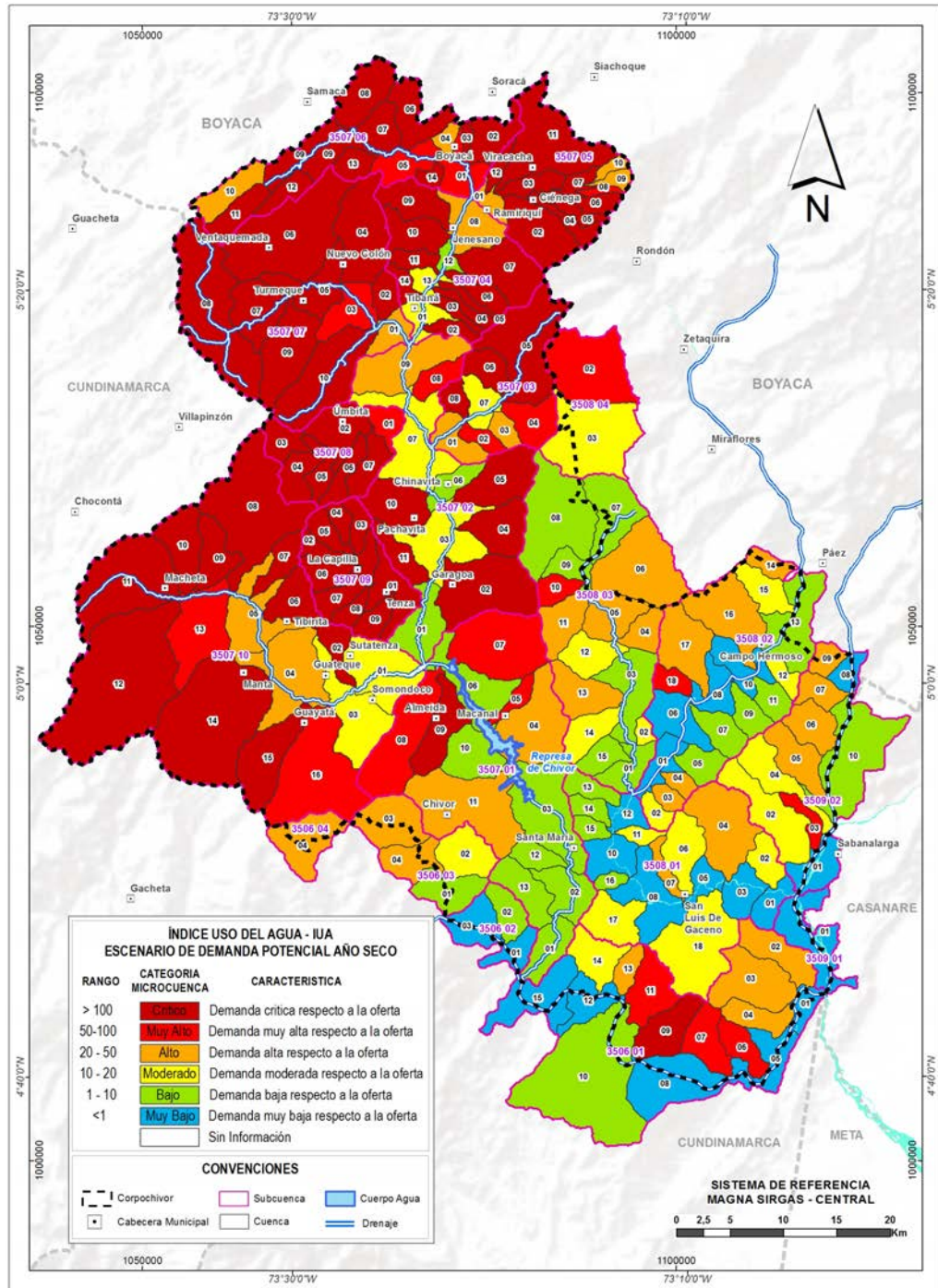


Figura 33. Índice de uso de agua [IUA] - escenario demanda potencial con año seco

## **5.5. Índice de Extracción de Agua subterránea [IEAS]**

La siguiente tabla ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IEAS presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor. Como se puede observar, las (pocas) unidades hidrográficas que presentan información relacionada con la explotación de aguas subterráneas (81) para algún sector presentan una presión mayoritariamente entre Baja (45 microcuencas) y Muy baja (15 microcuencas). Adicionalmente, se observan algunas microcuencas con categorías Moderado (11 microcuencas), Alto (9 microcuencas) y Crítico (1 microcuena) en la parte superior del área de estudio. De nuevo, las microcuencas ubicadas en Úmbita (3507 08 03) y Ciénaga (3507 05 04) se destacan por presentar una presión Alta de sobre el agua subterránea para uso doméstico y agropecuario, y doméstico, respectivamente.

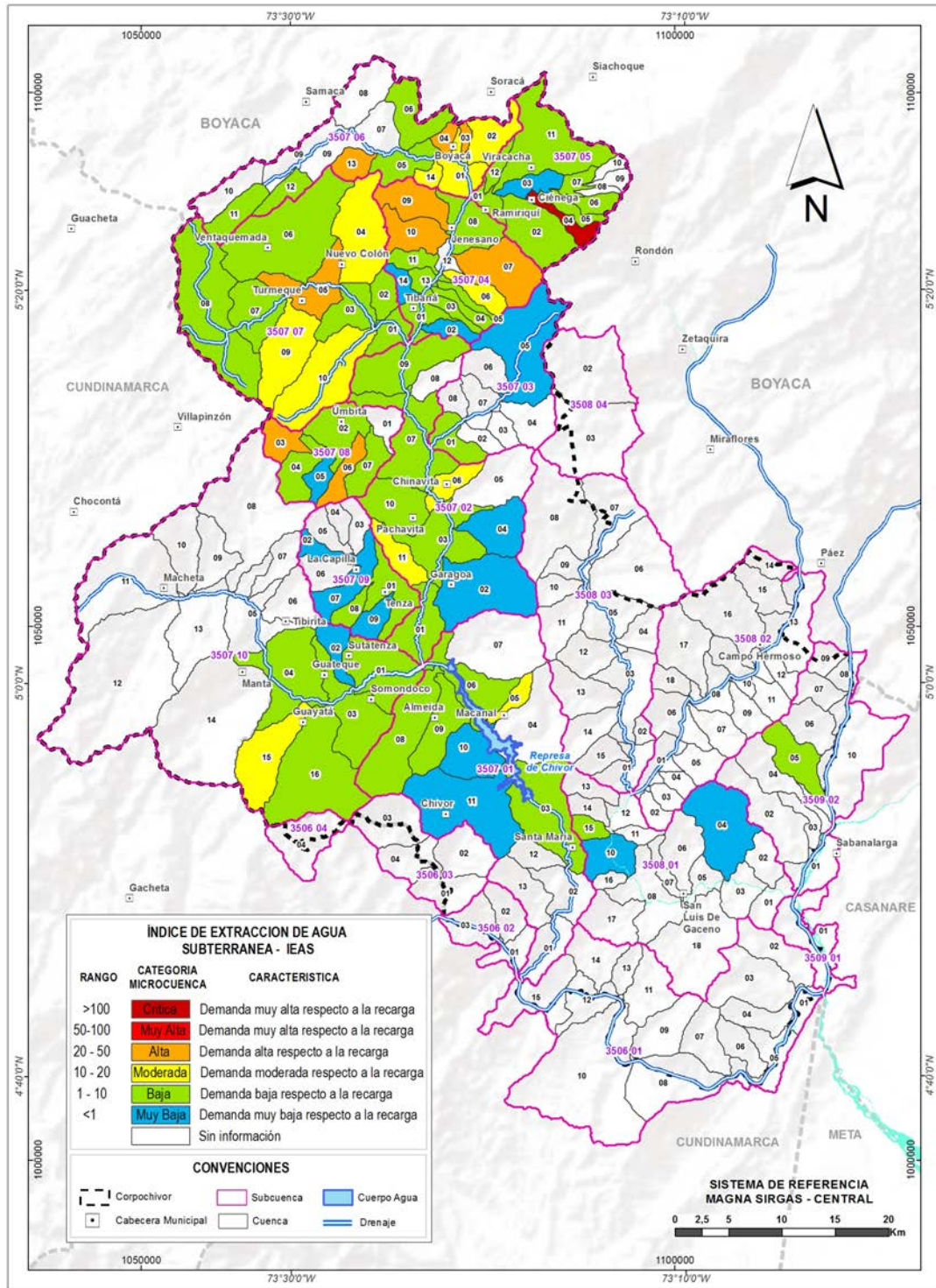


Figura 34. Índice de uso de extracción de agua subterránea [IEAS]

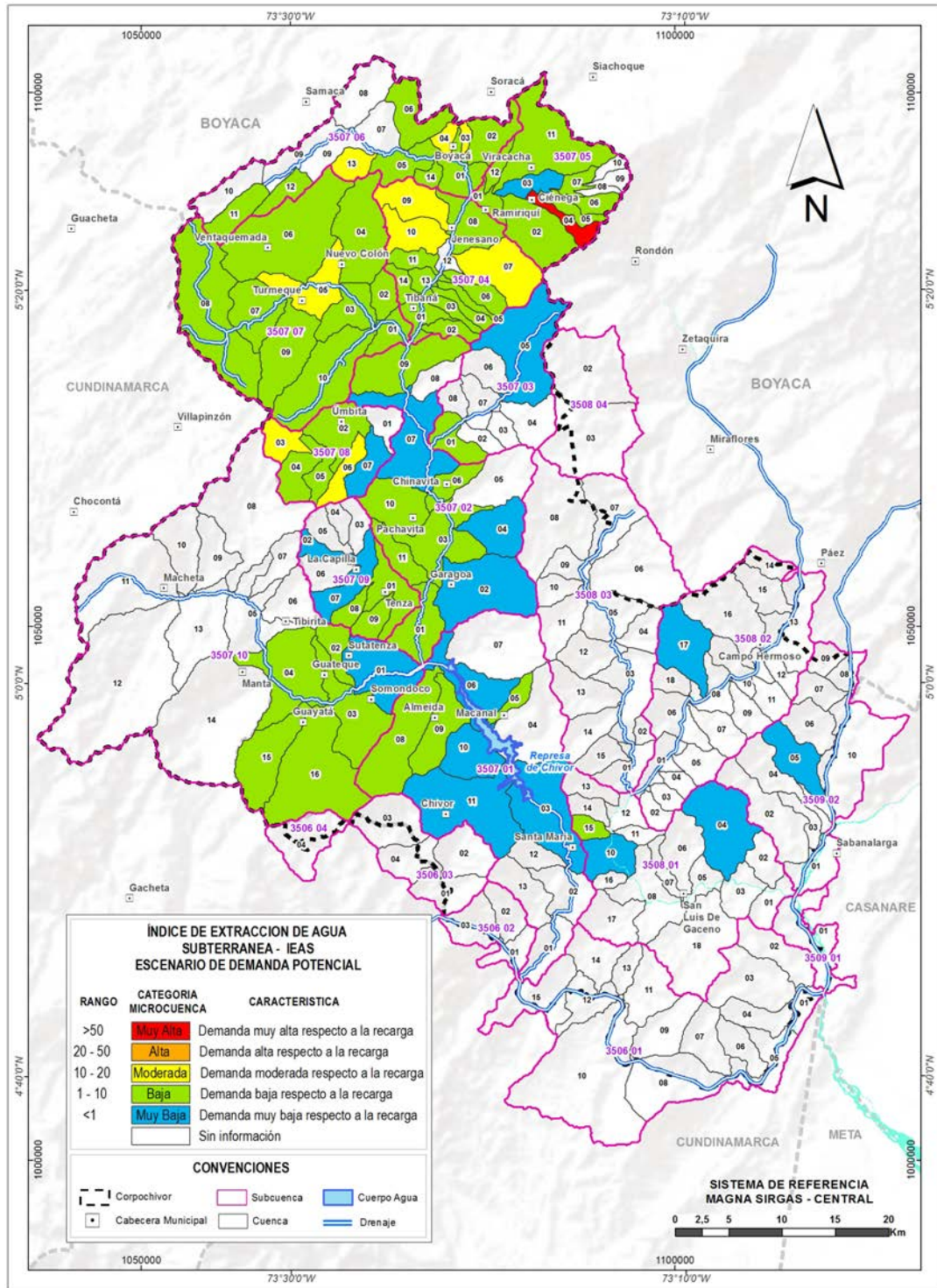


Figura 35. Índice de uso de extracción de agua subterránea con demandas potenciales [IEAS]

## 5.6. Índice de Agua subterránea para Abastecimiento Público [IASAP]

La Figura 36 ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IASAP presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor. Como se puede observar, la presión sobre las aguas subterráneas para abastecimiento público es principalmente Baja (11 microcuencas) y Muy baja (66 microcuencas). Esto resulta paradójico ya que, por ejemplo, unidades hidrográficas como 3507 08 03 y 3507 05 04 presentan una presión Alta en el índice de extracción de aguas subterráneas (IEAS), pero una presión Baja/Moderada en este índice IASAP; cuando la explotación de aguas subterráneas se realiza primordialmente para abastecimiento doméstico. Lo anterior sugiere que las categorías empleadas no reflejan enteramente la intensidad de uso que se realiza sobre el recurso hídrico subterránea para uso doméstico y posiblemente se requiere repensar categorías más apropiadas que reflejen la presión sobre el recurso para uso doméstico.

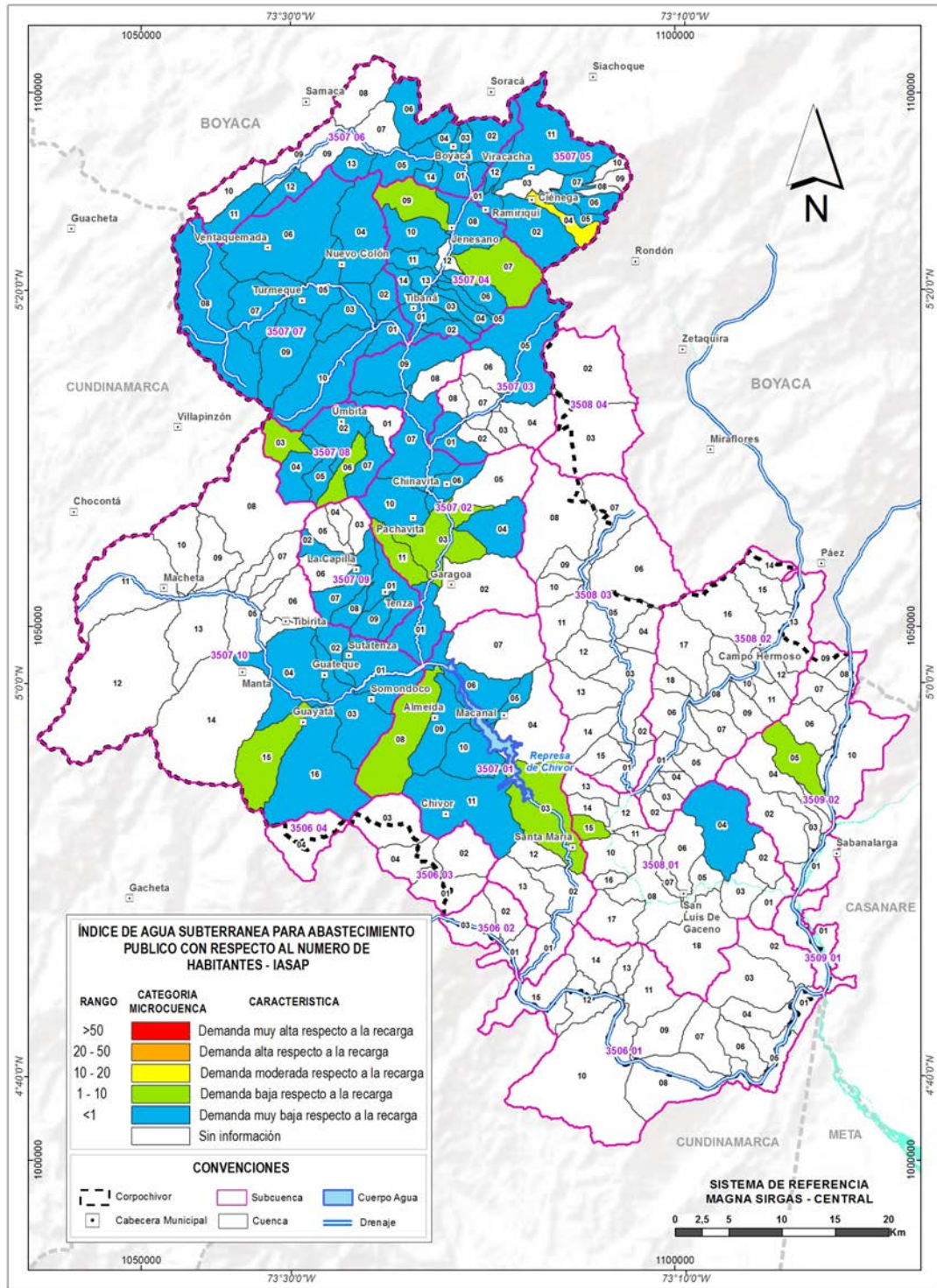


Figura 36. Índice de Agua subterránea para Abastecimiento Público [IASAP]

## 5.7. Índice Integral de Uso de Agua [IIUA]

La Figura 37 ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IIUA presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor. Como se observa, este indicador IIUA describe un patrón similar al encontrado en el IUA para año hidrológico medio en donde la mayoría de las microcuencas caen en las categorías Muy bajo (56 microcuencas), Bajo (44 microcuencas), sin información (94 microcuencas), y en donde las unidades hidrológicas 3507 08 03 y 3507 05 04-06 presentan una presión entre Muy alta y Moderada, respectivamente. Por lo que se observa que el índice IIUA representa en estas microcuencas adecuadamente las presiones observadas sobre el recurso hídrico superficial (IUA) y subterráneo (IEAS).

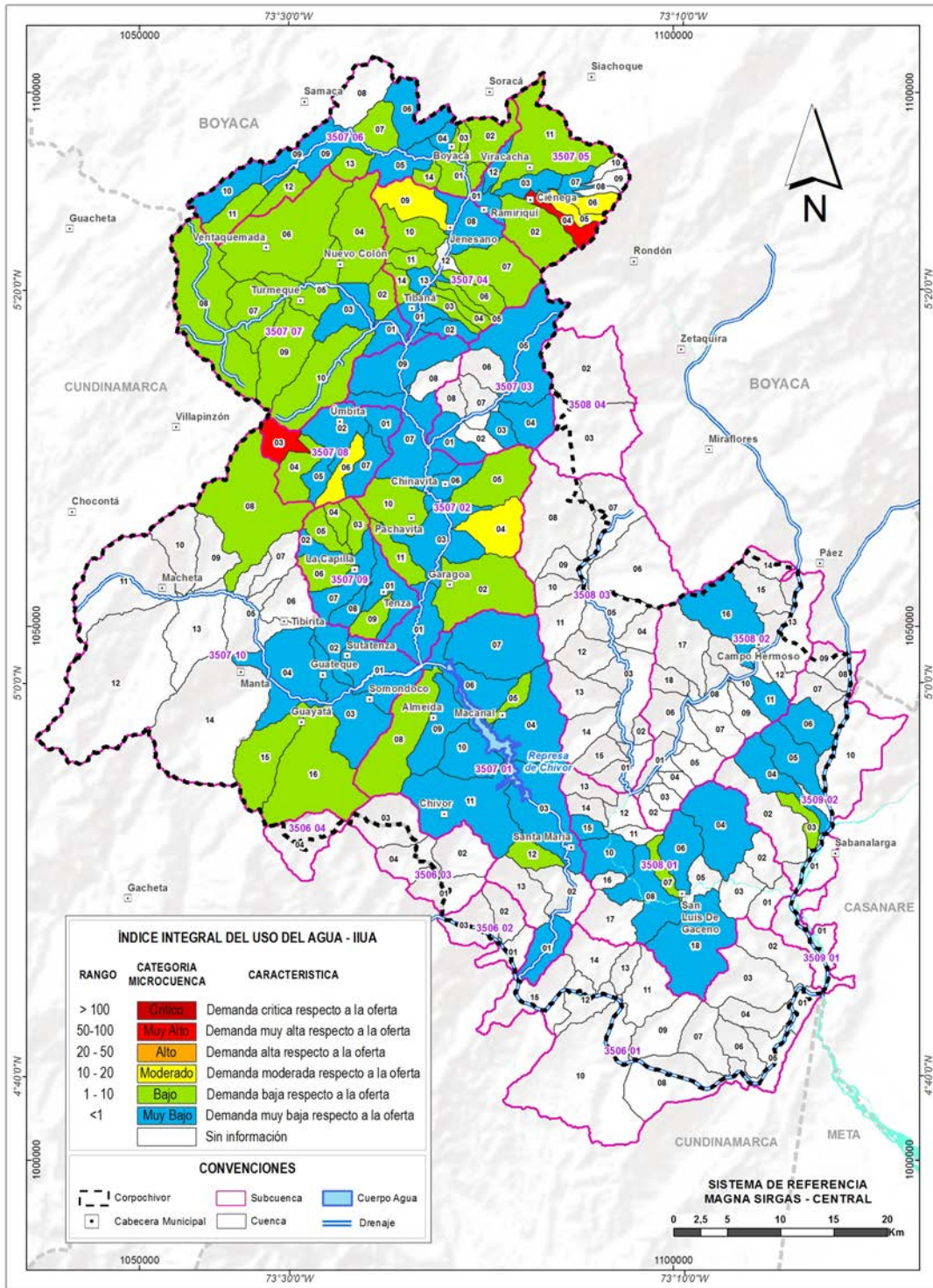


Figura 37. Índice Integral de Uso de Agua [IIUA]

## 5.8. Índice de calidad del Agua [ICA]

En la Figura 38 se presenta el índice de calidad de Agua ICA calculado para los muestreos realizados en el año 2018 siguiendo la metodología planteada por el IDEAM. Nótese que, en la cuenca alta, la calidad de agua es aceptable y cuando llega al río Garagoa se deteriora, encontrándose en la categoría regular. Aguas abajo, se alcanza a llegar a la categoría mala. La tendencia de las estaciones de calidad de agua que tienen mediciones de calidad desde el año 2001 es a disminuir su calidad.

En la Figura 39 puede observarse el cálculo del ICA siguiendo la metodología definida por Corpochivor. En general, para todos los puntos de muestreo se observa “un cuerpo de agua con indicios de contaminación”. Sin embargo no se pueden observar diferencias entre el indicador en los puntos de monitoreo.

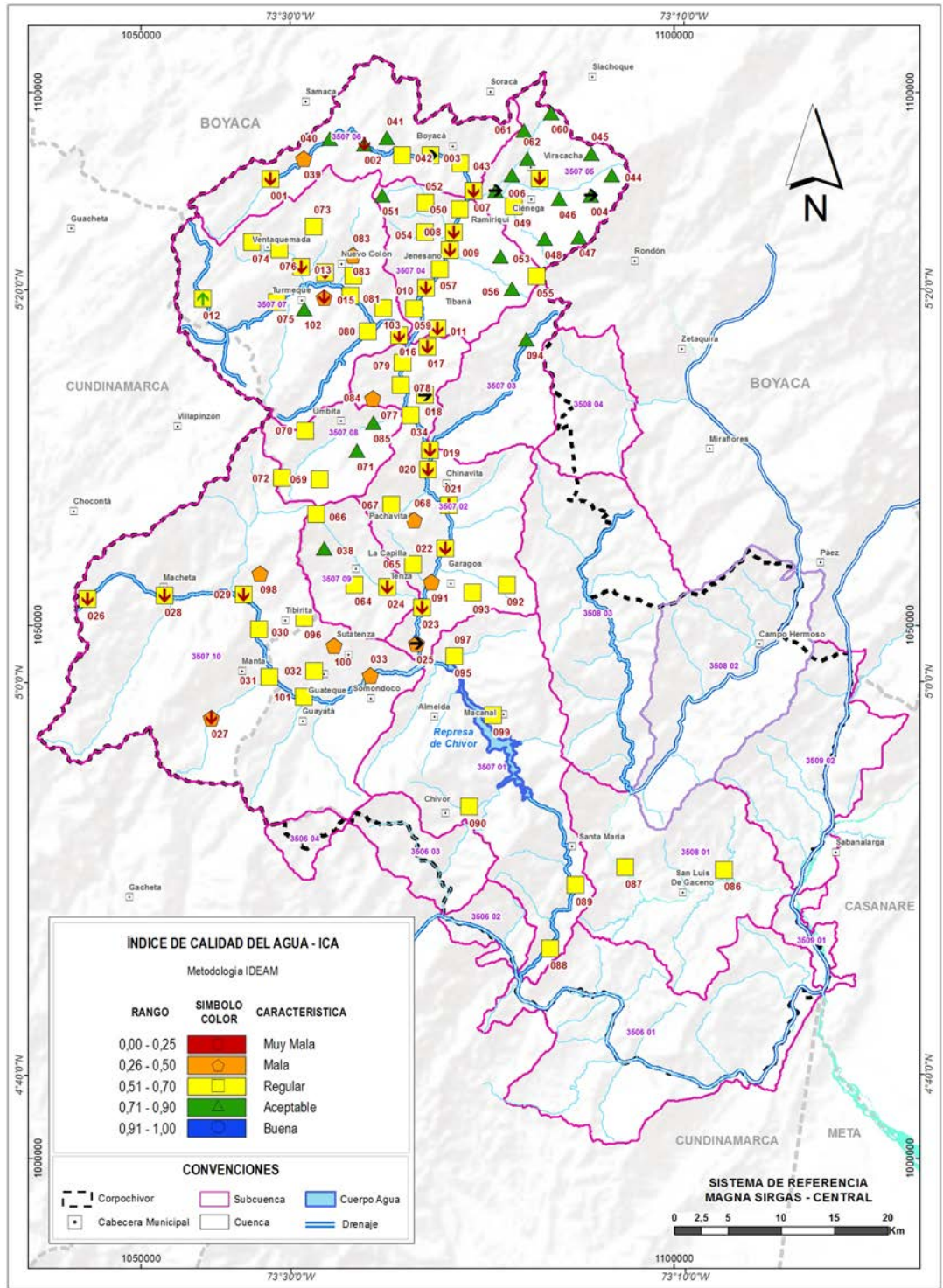


Figura 38. Índice de Calidad de agua IDEAM [ICA]

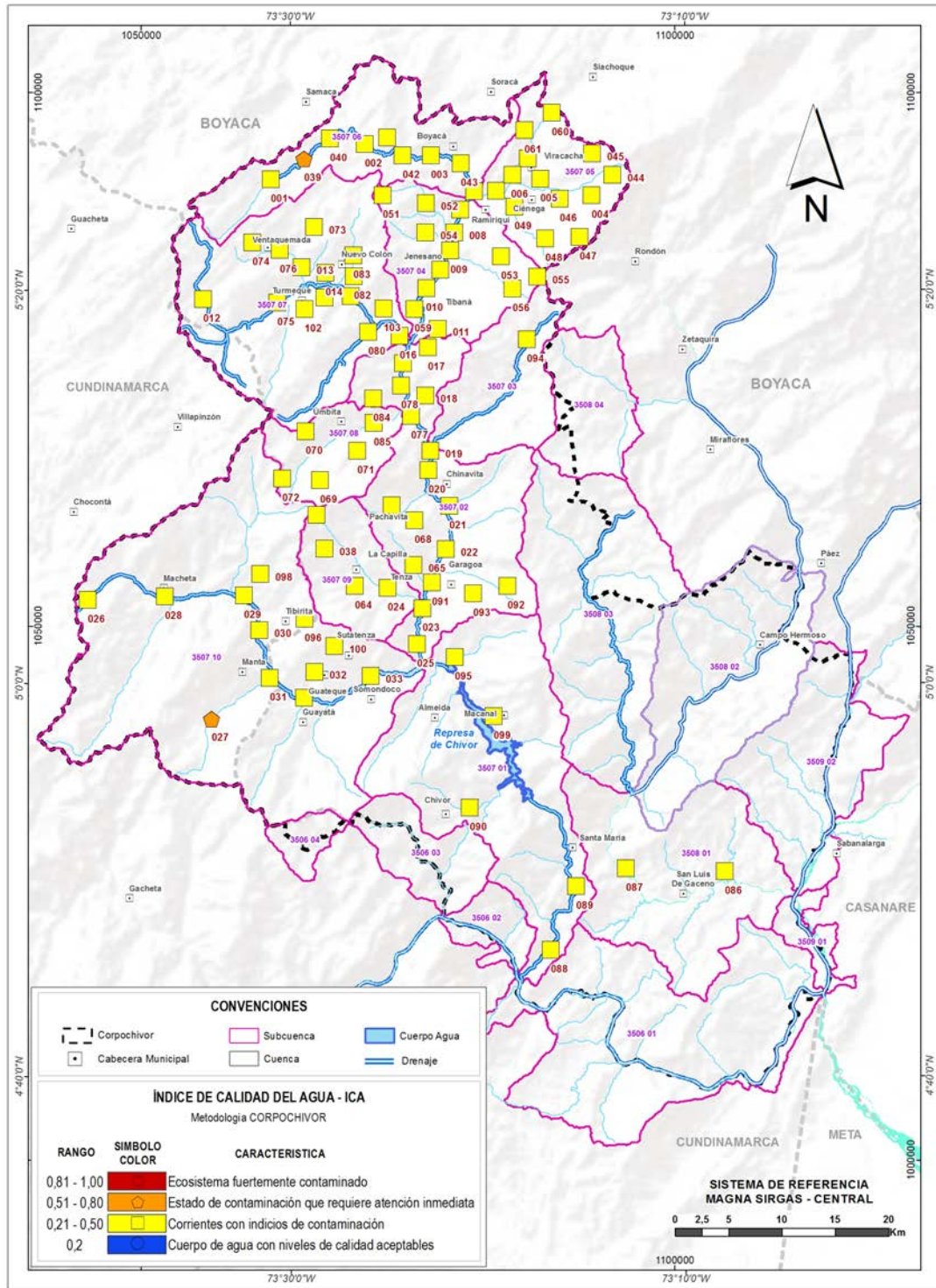


Figura 39. Índice de calidad de agua Corpochivor [ICA]

## **5.9. Índice de Alteración potencial de la Calidad de Agua [IACAL]**

El índice de alteración potencial de la calidad de agua IACAL, presenta una clasificación “Muy alto” en un gran porcentaje de la cuenca, principalmente en las áreas más intervenidas. En la cuenca alta principalmente, donde se observan más áreas dedicadas a cultivos y pastos, puede estar generándose una alta contaminación con descargas difusas asociadas a estas actividades. En la parte baja el indicador presenta una clasificación menor, llegando a valores bajos. Para caudal medio (Figura 40) la condición es menos crítica que para caudal bajo (Figura 41).

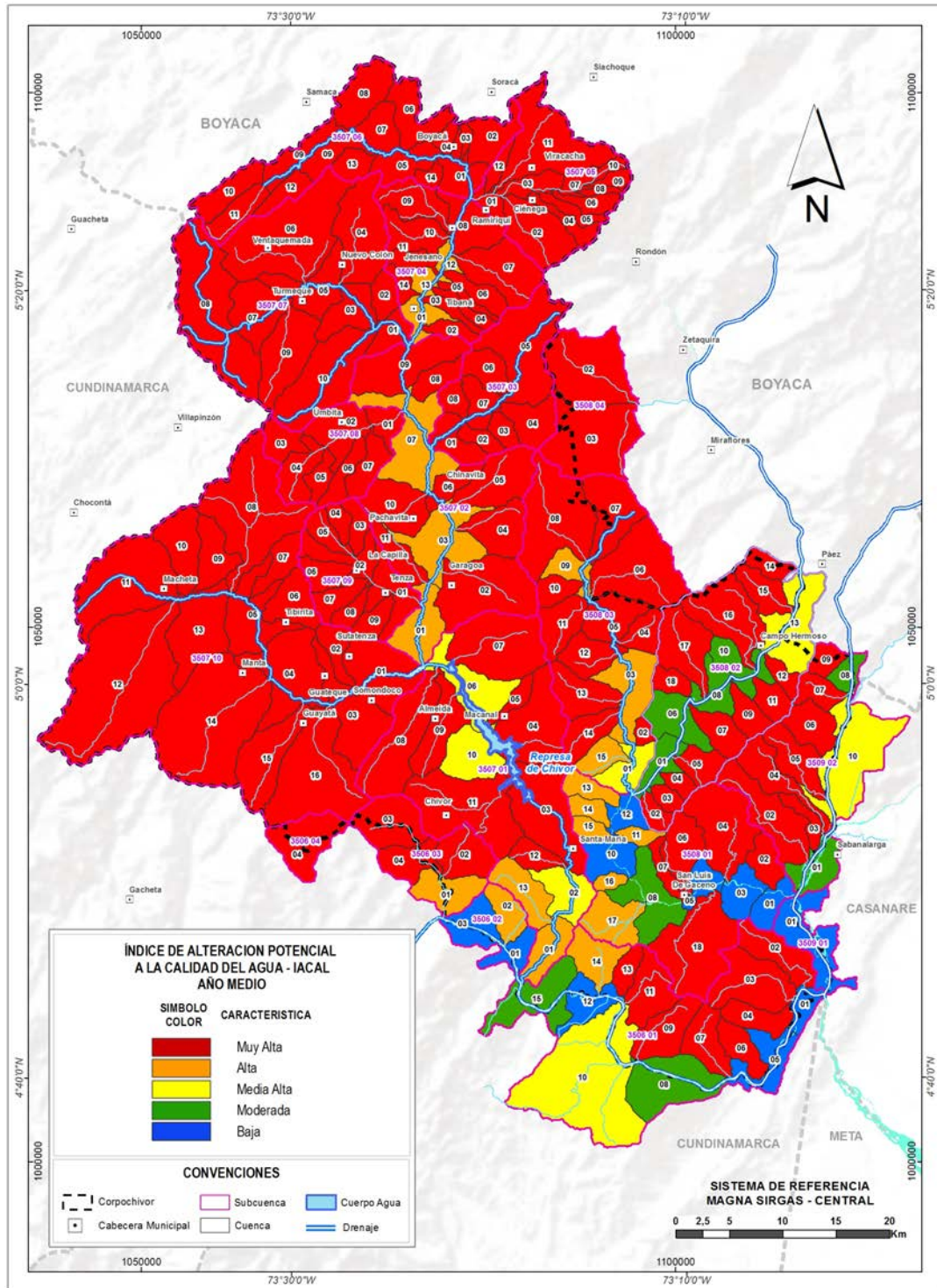


Figura 40. Índice de alteración de la calidad de agua año medio [IACAL]

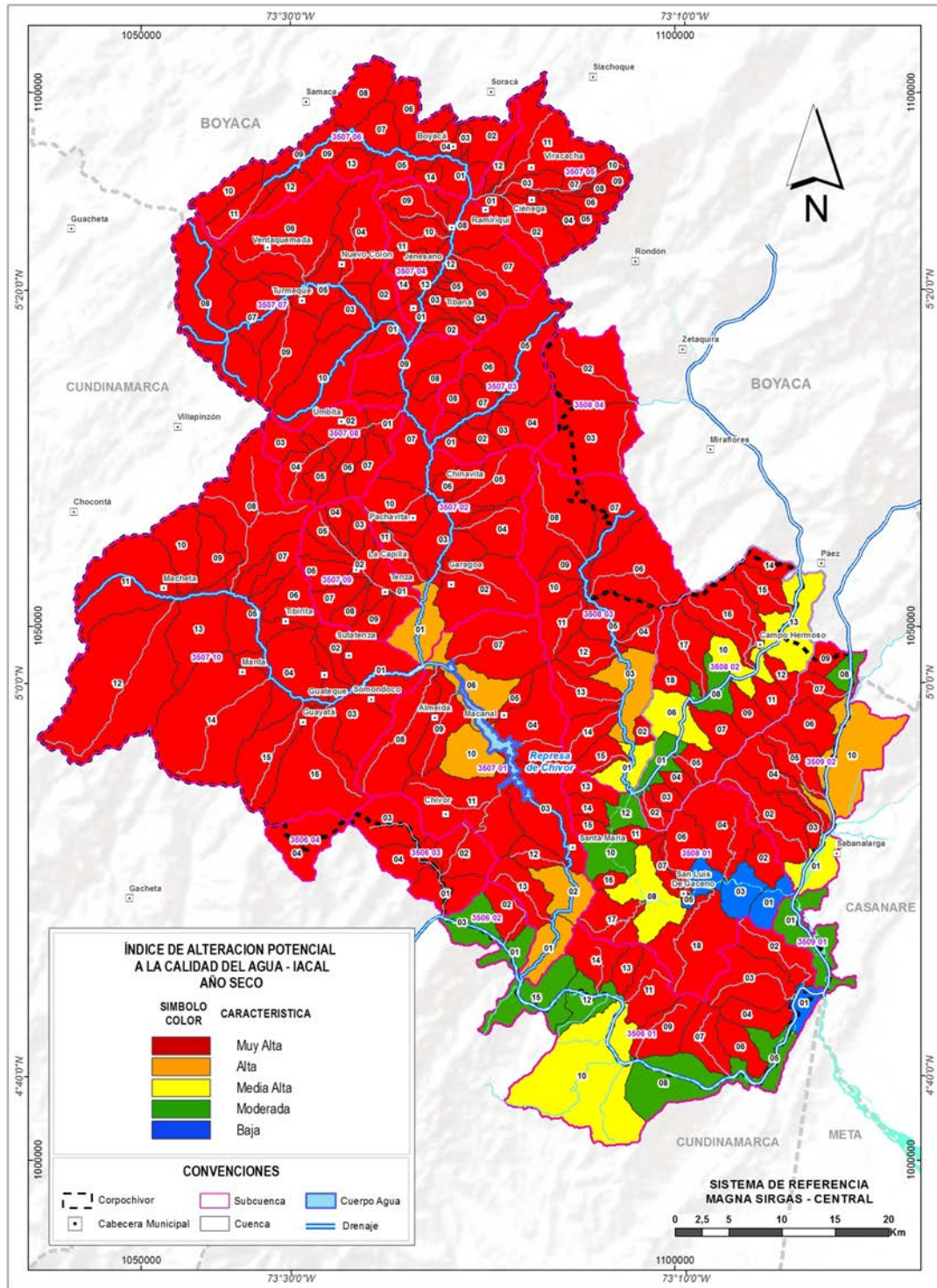


Figura 41. Índice de alteración de la calidad de agua año seco [IACAL]

## **5.10. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico [IVH]**

La Figura 42 ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IVH presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor. Como se puede observar, en general el área de interés presenta vulnerabilidad Media (96 microcuencas) por desabastecimiento hídrico que resulta de tener una muy baja capacidad de retención de agua y algún tipo de presión (Muy bajo o Bajo) sobre el recurso hídrico superficial. En este sentido, las unidades hidrográficas que presentan mayor presión (3507 08 03, 3507 05 04-06, 3507 02 04), que se encuentran en la parte superior de la subzona hidrográfica de Garagoa, se destacan por presentar vulnerabilidad Alta (2 microcuencas) y Muy alta (3 microcuencas). Por su parte, la Figura 42, ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IVH presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor para condiciones hidrológicas secas. Como se observa, se mantiene la tendencia descrita en el año medio, en la cual las microcuencas con mayor presión hídrica, ubicadas en la parte superior del área de estudio, presentan vulnerabilidad Alta (16 microcuencas) y Muy alta (12 microcuencas). En estas unidades hidrológicas la capacidad hidrológica es muy baja mientras que presentan una presión que inicialmente se considera baja pero que durante un año hidrológico seco muestran una condición de vulnerabilidad considerable.

Por su parte, la Figura 44 ilustra la distribución espacial de las categorías del índice de IVH presentes en el área de jurisdicción de Corpochivor para un escenario de demanda potencial bajo año hidrológico medio. Como se puede apreciar, el patrón de susceptibilidad Media al desabastecimiento se mantiene como en las Figuras 42 y 43. Sin embargo, las microcuencas que presentan una presión importante en el Índice de Uso del Agua (categorías Moderado o Alto en el escenario Potencial) cambian a categorías Alta y Muy alta. Esto como consecuencia de la baja capacidad de regulación hídrica de las microcuencas de esta zona de estudio. Asimismo, se puede observar para este mismo escenario Potencial que durante un periodo hidrológico seco las microcuencas que se ubican al margen izquierdo entre las subzonas hidrográficas de Guavio y Garagoa, presentan muchas más categorías Alta y Muy Alta como consecuencia de una mayor demanda de agua—a causa de su cobertura agrícola—como se explica en el índice en el índice de IUA para un escenario de demanda potencial

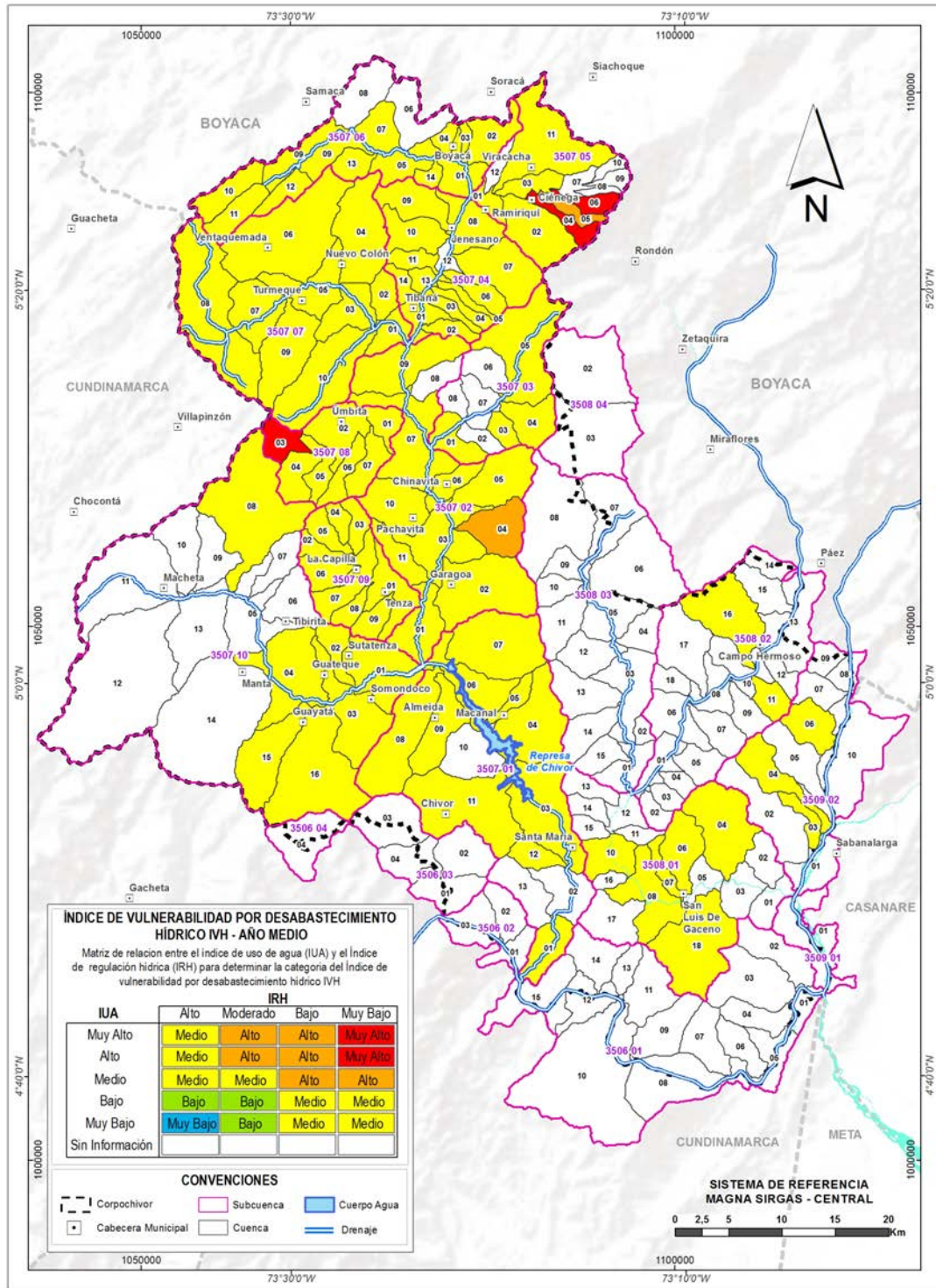


Figura 42. Índice de vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento [IVH]- año medio.

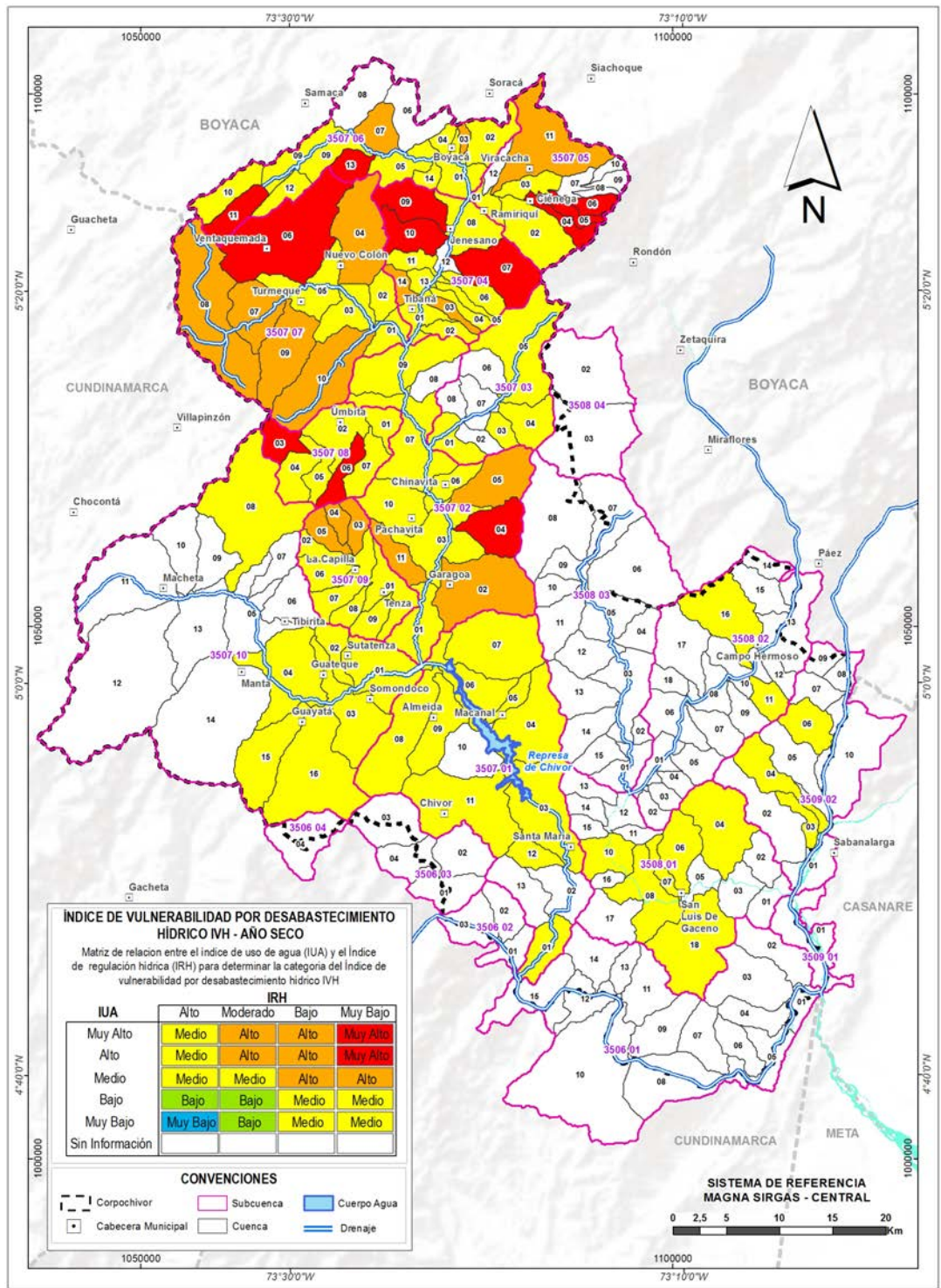


Figura 43. Índice de Desabastecimiento Hídrico [IVH] - Año Seco

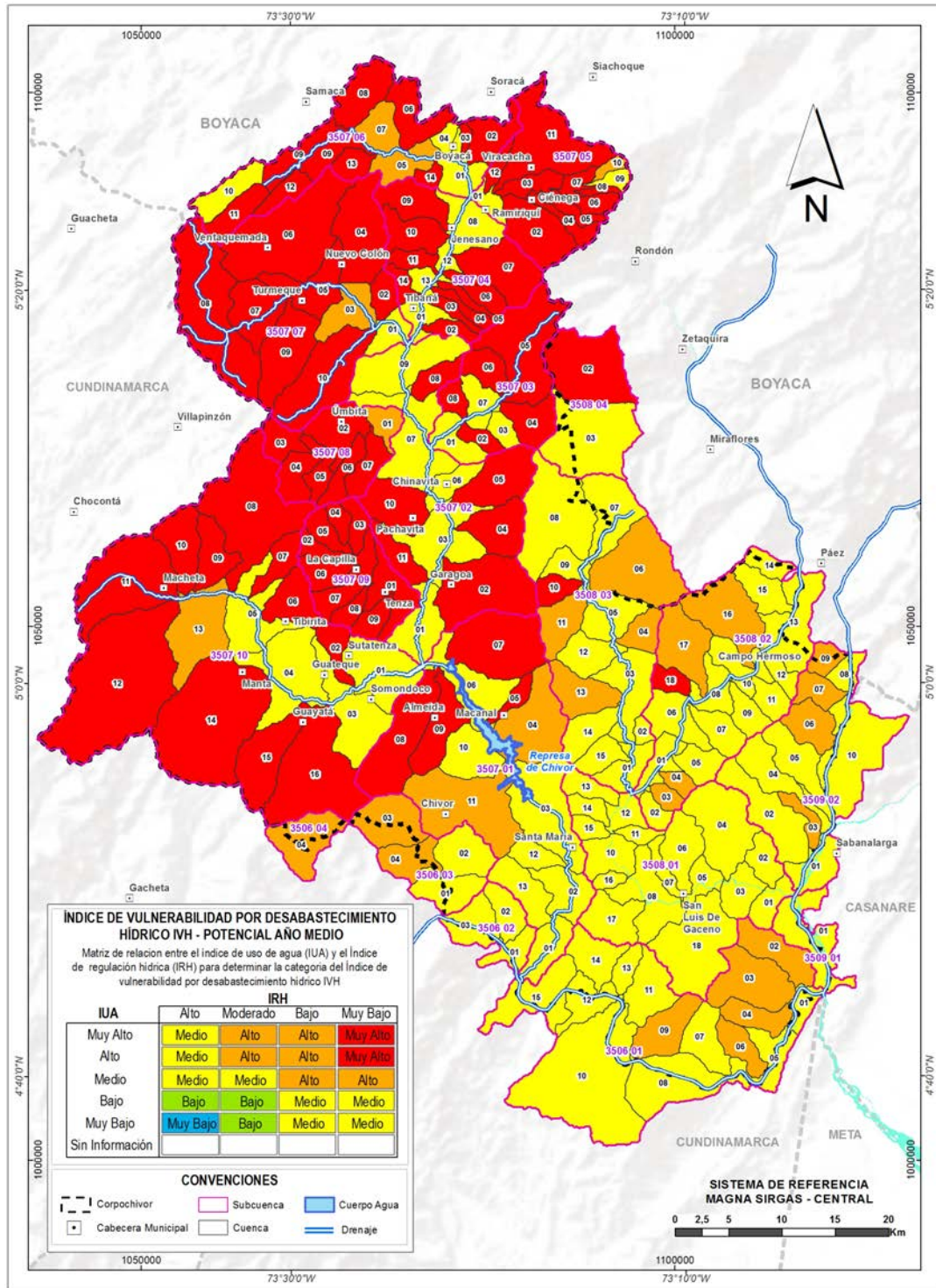


Figura 44. Índice de Desabastecimiento Hídrico [IVH] - escenario demanda potencial con año medio

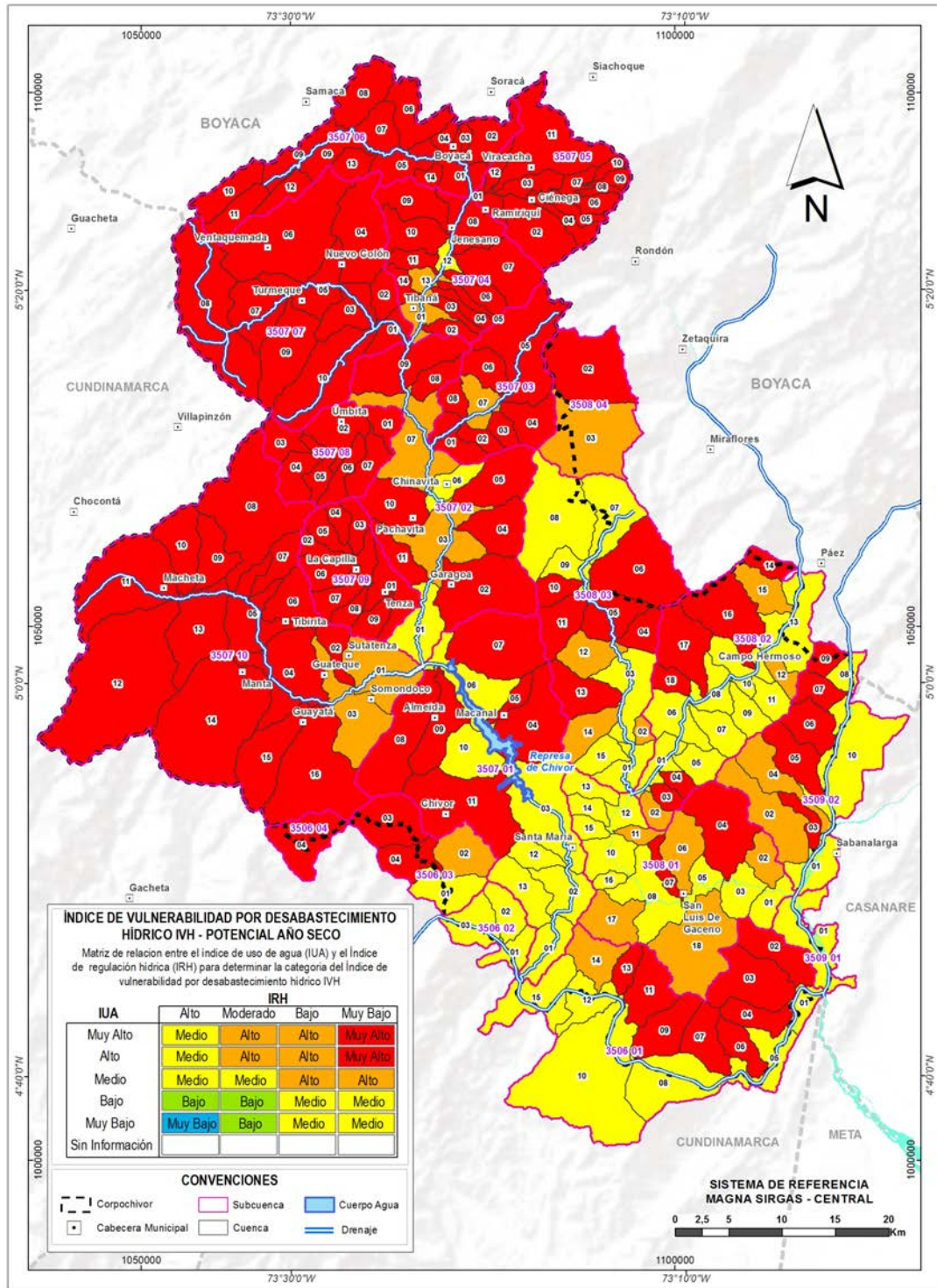


Figura 45. Índice de Desabastecimiento Hídrico [IVH] - escenario demanda potencial con año seco

## 5.11. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales [IVET]

El índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) se determinó a partir de los índices morfométrico y variabilidad. El índice morfométrico relaciona la pendiente, densidad de drenaje y la morfometría de las cuencas como se indica en la Figura 46. Se empleó un modelo digital de elevación del terreno (DEM) generado a partir del satélite de observación ALOS PARSAL con resolución espacial de 12.5 metros para producir la pendiente media de cada microcuenca (imagen A). Por su parte, se empleó una base de datos de drenajes y corrientes simples escala 1:2500 suministrada por el IGAC para generar la densidad de drenaje que indica la relación promedio de la longitud de drenaje con el área que abarca ese drenaje (imagen B). Finalmente, la cartografía generada para delinear las microcuencas se empleó para estimar el coeficiente de compacidad a partir de la relación perímetro y área de cada microcuenca (imagen C).

Por su parte el índice de variabilidad que relaciona caudales y sus respectivos porcentajes de excedencia de la curva de duración de caudal diario (Figura 47) se derivó de la curva de duración de caudal que se generó para evaluar el índice de retención y regulación hídrica. Para esto se generó un script (CDC.vbs) que produce distintos caudales y sus respectivos porcentajes para

cada microcuenca (Figura 48). El archivo final se encuentra en la carpeta ERA\_Output del proyecto.

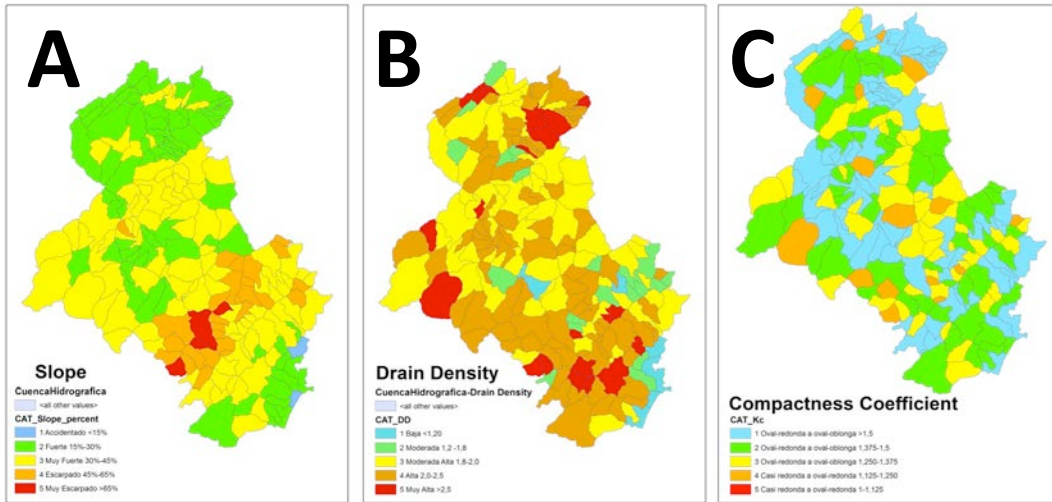


Figura 46. Esquema de la evaluación de parámetros morfométricos en el área bajo jurisdicción de Corpochivor

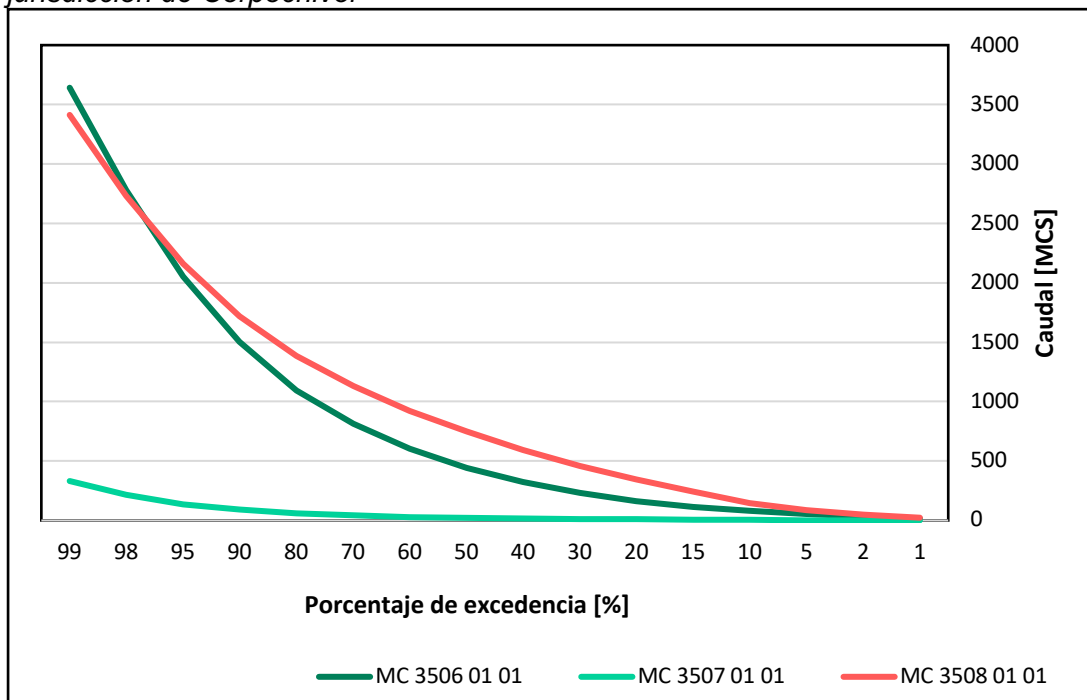


Figura 47. Curva de duración de caudal para algunas microcuencas en el área de jurisdicción de Corpochivor.

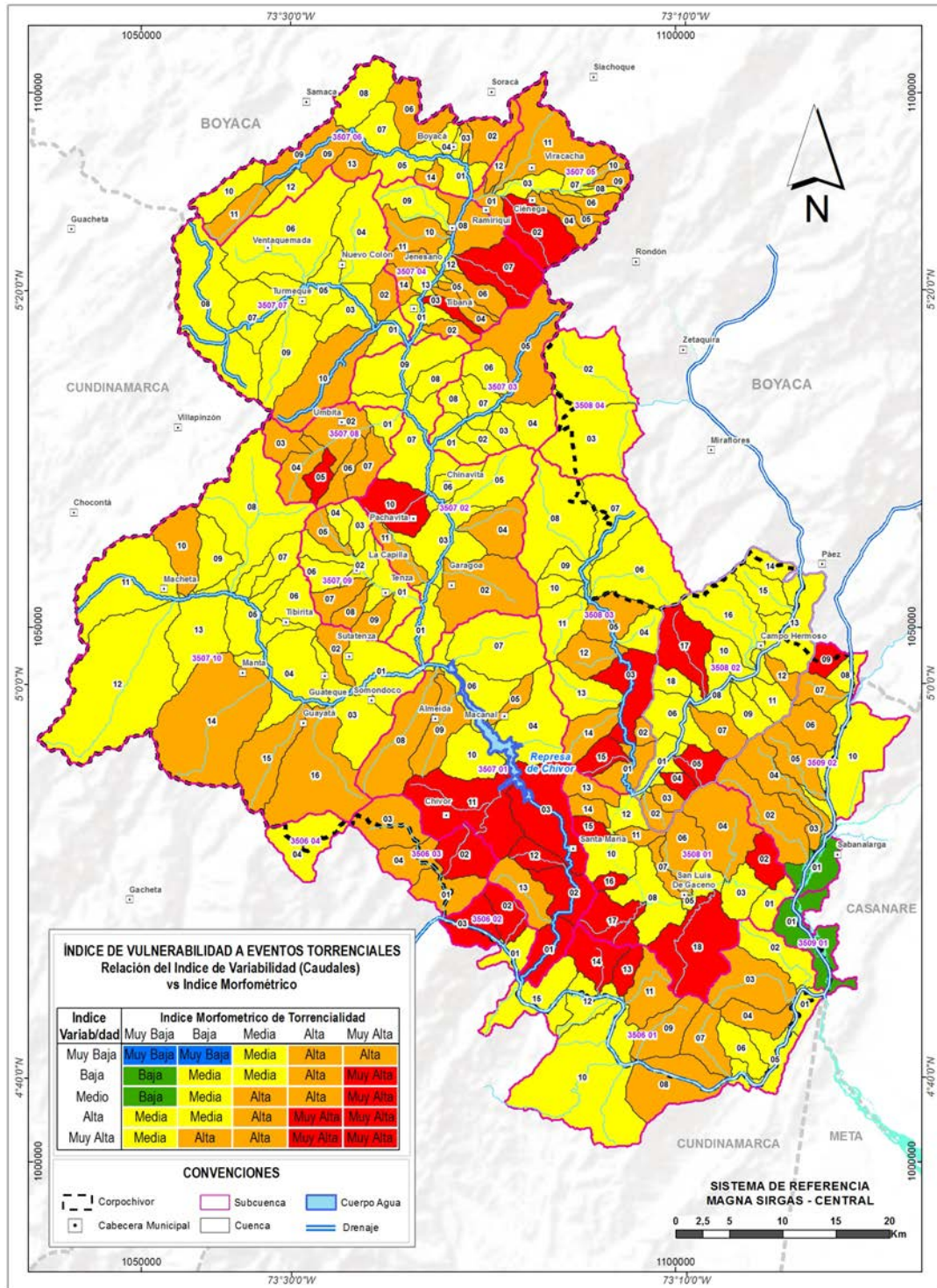


Figura 48. Índice de Vulnerabilidad a eventos torrenciales.

## 5.12. Visión General del Agua en Corpochivor

La Figura 49 ilustra el desempeño de las microcuencas en el área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Chivor frente a siete indicadores hídricos regionales. Cada línea gris representa una unidad hidrográfica y su desplazamiento sobre el eje horizontal describe su evaluación con respecto a cada indicador hídrico (eje paralelo). En este sentido, la escala de color magenta representa el rango crítico para cada indicador y la línea de color azul describe a la(s) microcuenca(s) con valores dentro de esos rangos críticos. Por ejemplo, las microcuencas reflejan mayor insuficiencia de la precipitación cuando IA presenta valores superiores a 0.40, así como mayor presión cuando los índices IUA, IEAS y IIUA reflejan valores superiores a 20. Dado que la mayoría de las microcuencas presentan una muy baja respuesta hidrológica cuando el índice IRH es inferior a 0.50, en este sentido, la línea de color azul corresponde a la microcuenca que presenta un pobre desempeño entre los distintos indicadores hídricos, y por tanto puede ser considerada como la microcuenca a priorizar en el marco de algún instrumento de gestión y planificación. Esta microcuenca es la 3507 08 03, la cual se localiza en el municipio de Úmbita. La microcuenca 3507 05 03 se ubica dentro de casi todos los rangos críticos, excepto sobre el eje del índice de Aridez (IA), donde su cobertura no presenta deficiencia de agua.

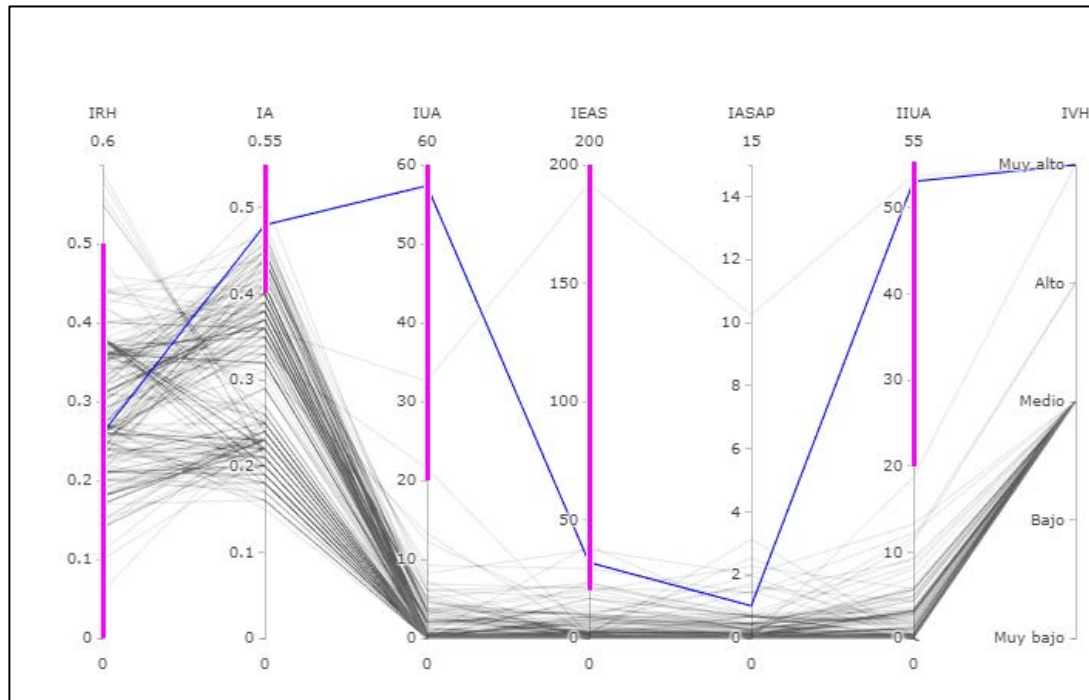
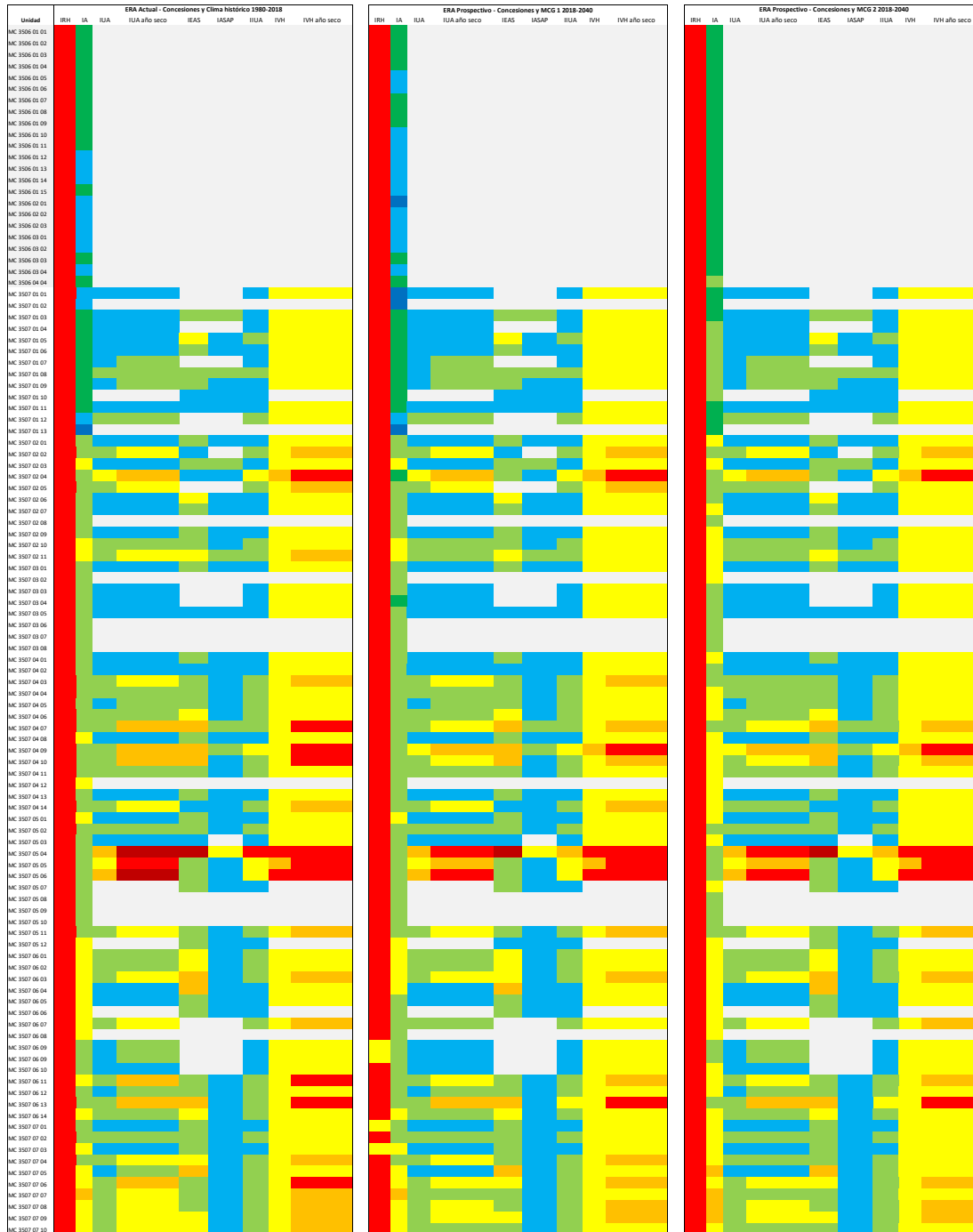


Figura 49. Diagrama de coordenadas paralelas de los indicadores hídricos regionales en Corpochivor

### 5.13. Mapas de Calor de la Evaluación de Indicadores Hídricos Regionales Actuales y Proyectados

Los mapas de calor o Heatmaps (Figura 50), permiten comparar el escenario histórico con los escenarios de cambio climático y crecimiento de la población proyectados al año 2040. Para cada microcuenca (en las filas) se incluyen los resultados de cada indicador (en las columnas) agrupados en tres recuadros. El primero corresponde al escenario históricos y los otros dos corresponden a los indicadores bajo escenarios de cambio climático y crecimiento de la población.

Esta información permite a la Corporación incluir es un análisis prospectivo una gama de posibles futuros basados en estos dos factores de incertidumbre en las decisiones que deben afrontar. En el Anexo 4 se presenta el archivo en Excel donde se puede consultar esta herramienta.



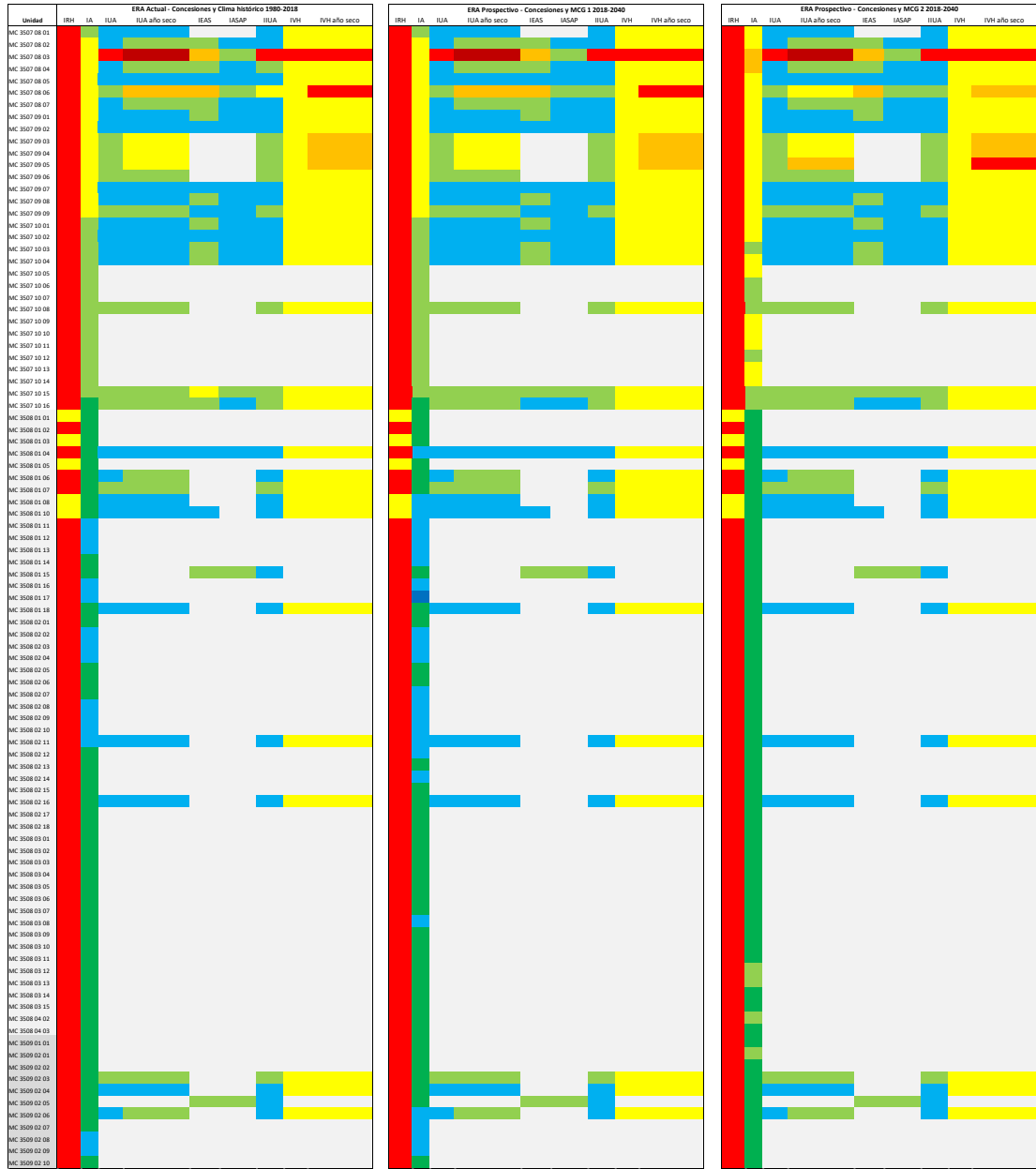


Figura 50. Heatmaps de la evaluación de indicadores hidricos regionales en condiciones actuales [1980-2018] versus dos Modelos de Circulación Globales [2018-2040]

## 6. Conclusiones

La Evaluación Regional del Agua realizada entre la Corporación Autónoma de Chivor Corpochivor permitió consolidar tres productos de gran importancia para la Jurisdicción:

1. Un sistema soporte a las decisiones de manejo del agua que permite consolidar una base de datos de la Jurisdicción con la información de la demanda y oferta del agua, implementado en WEAP.
2. Una herramienta articulada con este sistema de apoyo a las decisiones para el cálculo de indicadores del ERA.
3. Profesionales que hicieron parte del proyecto con capacidad de manejar tanto las herramientas desarrolladas como los resultados de la ERA para la toma de decisiones regionales.

A continuación se resaltan algunas conclusiones por temas

- **Conclusiones métodos**

A partir de la modelación dinámica a través de WEAP se puede extraer información más allá de los indicadores. En este sentido, se puede usar la modelación dinámica para evaluar efectos en oferta y demanda en función de una escala temporal inferior a un año y explorando escenarios alternativos.

Se realizó una automatización de la evaluación de los indicadores hídricos regionales a través de su programación en Visual Basic Script.

La organización de información en formatos NETcdf permite contar con información de coberturas y usos del suelo y la regionalización del clima que permite la actualización del modelo con información detallada en escala diaria (para el clima).

- **Conclusiones resultados**

Las unidades hidrológicas con baja capacidad de regulación hídrica y oferta ambiental limitada como consecuencia de aridez media puede presentar dificultades para hacer frente a la variabilidad y cambio climático en un futuro mediano.

El desarrollo de escenarios con dos demandas hídricas diferentes (concesiones y potencial) refleja que la corporación puede estar desestimando las demandas en algunas microcuencas con vocación agrícola, y que, a su vez, la base de datos de concesiones no comprende el número total de usuarios y extracciones en el área de jurisdicción de Corpochivor.

El clima y la hidrología obtenidos en el modelo pueden ser usado para tomar otras decisiones requeridas, en escala diaria y en áreas que no se encuentren instrumentadas.

Los escenarios de cambio climático obtenidos a través de este convenio permiten analizar como se espera que varíen los extremos climáticos en la cuenca. En este sentido, permiten analizar posibles variaciones en los índices principalmente interesantes en años secos cuando se verán más afectados. Estos indicadores pueden ser usados en otros instrumentos de planificación e.g. POMCA, PORH, para contemplar posibles futuros bajo condiciones climáticas más extremas.

El análisis de tendencias de la calidad de agua permite concluir que en los cauces principales la calidad de agua de los ríos se está deteriorando. Adicionalmente, de acuerdo con el IACAL, el agua puede alterarse por las actividades económicas que se están adelantando en la cuenca.

- **Recomendaciones y otros**

La clasificación de los indicadores siguiendo los rangos definidos por el IDEAM debería evaluarse porque estos rangos se han definido de acuerdo con la escala Nacional. En la reunión sostenida con el IDEAM, se abrió la posibilidad de ajustar los rangos de acuerdo con criterios que pueden definirse regionalmente. Esta clasificación es importante para indicadores relacionados con el caudal de cada microcuenca como el IACAL o IUA.

La calibración del modelo puede mejorarse si se logra integrar información detallada de operación de los embalses en la Jurisdicción y aguas arriba de la

misma. Se recomienda continuar la gestión con las entidades correspondientes que pueden aportar en el conocimiento detallado del sistema hídrico.

Los indicadores obtenidos dan cuenta del estado actual de las microcuencas en la Jurisdicción. Sin embargo, pueden aportar también en la gestión con otras Corporaciones Autónomas Regionales tales como CAR y Corpoboyacá con la cual comparten cuencas en las cuales se requieren proyectos conjuntos para garantizar el recurso hídrico.

Las demandas de agua se encuentran concentradas en algunas áreas de la Jurisdicción de Corpochivor y por lo tanto se recomienda continuar con los proyectos de legalizaciones de concesiones que propenden por cuantificar el total de agua demandada. Esto es muy de gran interés en áreas como las cuencas de Upía y Chivor que en la actualidad tienen muy pocos usuarios registrados.

La calidad de agua en la jurisdicción se está deteriorando y debido a que es un bien escaso, por las características propias regionales, se recomienda generar programas que propendan por controlar los vertimientos que deterioran el recurso hídrico. Además, de acuerdo con el taller realizado con Corpoboyacá, existe interés por parte de las dos Corporaciones de integrar información en la plataforma WEAP que les permita tomar decisiones robustas para el manejo eficiente del agua.

## 7. Bibliografía

---

- Consortio Río Garagoa. (2016). *Actualización del POMCA Río Garagoa, Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Garagoa*. Garagoa.
- Consortio Río Garagoa. (2017). Fase de Diagnóstico 03. Caracterización Físico-Biótica 3.3 Hidrogeología. In *Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas –POMCA del Río Garagoa* (p. 118).
- Daza-Torres, M. C., Hernandez\_Florez, F., & Triana, F. A. (2014). Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo de Sumapaz, Colombia. *Revista Fac.Nac. Agron. Medellín*, 67(1), 7189-7200.
- Garagoa, C. R. (2017). *POMCA río Garagoa*.
- Golde Software, S. (2018). *User´s Guide- Countouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers, Colorado*.
- IDEAM. (2013a). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*. Bogota.
- IDEAM. (2013b). *Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia* (N. O. Vargas M. & M. Garcia H., Eds.). Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- IDEAM. (2016). *NUEVOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO PARA COLOMBIA 2011 - 2100 . HERRAMIENTAS CIENTIFICAS PARA LA TOMA DE DECISIONES. Estudio Técnico Completo*. Bogotá.
- Investigaciones Geotecnicas Ltda. (2003). Capítulo 36 - Hidrogeología. In *Consultoría para la Homologación Y Estructuración de la Información Cartográfica Base y Temática Existente en la CORPOCHIVOR para ser ingresada al SIAT*.
- JAM Ingeniería y Medio Ambiente SAS. . (2018). *Evaluación Regional del Agua ERA para las subcuencas Teatinos, Juyasía y Tibana*. Corpochivor.
- Llanopozos SA. (2019). *CONSULTORÍA PARA REALIZAR PRUEBA DE BOMBEO O PRUEBA HIDRÁULICA A POZOS PROFUNDOS LOCALIZADOS EN LA JURISDICCIÓN DE CORPOCHIVOR, EN EL MARCO DE FORMULACIÓN DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUIFEROS TEATINOS Y SÚNUBA*. Bogota.
- MAVDT. (2003). *RAS, Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico*.

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación*. Bogotá.
- Purkey, D., Arias, M., Mehta, I., Forni, L., & Depsky. (2018). A philosophical justification for a novel analysis-supported, stakeholder-driven participatory process for water resources planning and decision. *Water*, 10(8). doi:<https://doi.org/10.3390/w10081009>
- Stockholm Environment Institute. (1991). *User Guide for WEAP Version 91.10*. Boston. USA.
- Stockholm Environmental Institute. (2019). *Water Evaluation an Planning System WEAP. Used Guide. Web- based* . SEI. Obtenido de <https://www.weap21.org/WebHelp/index.html>
- van der Kwast, H., & Menke, K. (2019). Obtenido de QGIS FOR HYDROLOGICAL APPLICATIONS : recipes for catchment hydrology and water management: <http://locatepress.com/hyd>
- Vargas Quintero, M. C. (2010). Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación. *Ministerio De Ambiente Vivienda Y Desarrollo Territorial*, pp. 1–30. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Yates, D., Sieber, J., Pukey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), 487-500. doi:<https://doi.org/10.1080/02508060508691893>



---

Instituto de Ambientel de Estocolmo  
Calle 71 No 11- 10 Ofc 801.  
Bogotá Colombia

**Contact:**

[tania.santos@sei.org](mailto:tania.santos@sei.org)  
[hector.angarita@sei.org](mailto:hector.angarita@sei.org)

**Contact:**

@SEIresearch  
@SEIclimate  
@SEIenEspañol

---