Evaluación Regional del Agua – Corporación Autónoma Regional del Atlántico

Informe ERA-CRA
Diciembre, 2023

Autores:
Tania Santos
Camilo González
Sebastián Aedo
Tatiana Forero

© Instituto de Ambiente de Estocolmo
David Purkey
Director Ejecutivo SEI Latinoamericano

Tania F. Santos
Líder Línea de Investigación Agua

Tania Santos, Camilo González, Tatiana Forero, Sebastián Aedo
Investigadores

Jesús León Insignares
Director Ejecutivo
Corporación Autónoma De Atlántico C.R.A.

Ayari Rojano
Supervisora del Convenio
Corporación Autónoma De Atlántico C.R.A.

Contenido

Contenido ii
Figuras v
Tablas x
Resumen ejecutivo 1
1. Objetivos del estudio 8
2. Fuentes de información 9
3. Caracterización del área de estudio 10
3.1. Dimensión física 11
3.1.1. Topografía 12
3.1.2. Red de drenaje 13
3.1.3. Coberturas y usos de la tierra 14
3.1.4. Suelos 16
3.1.5. Geología e hidrogeología 18
3.1.6. Subcuencas hidrográficas 24
3.1.7. Río Magdalena 28
3.2. Infraestructura hídrica 29
3.2.1. Embalse El Guájaro 29
3.2.2. Red de monitoreo de variables hidro-climáticas 33
3.3. Clima 35
3.3.1. Caracterización climática histórica 35
3.3.2. Proyecciones futuras de clima 48
4. Calidad de aguas 56
5. Usos de agua – Demanda 57
5.1. Procesamiento de la información histórica concesionada 58
5.1.1. Revisión y análisis inicial de la información 58
5.1.2. Asignación del caudal faltante según usos 59
5.2. Concesiones de agua en el río Magdalena, canal del Dique y embalse el Guájaro 60
5.2.1. Concesiones de agua en el río Magdalena 60
5.2.2. Concesiones de agua en el embalse El Guájaro 61
5.2.3. Concesiones de agua en el canal del Dique 61
5.3. Concesiones de agua en otras fuentes diferentes al río Magdalena, embalse El Guájaro y canal del Dique 61
5.3.1. Fuentes superficiales 63
5.3.2. Fuentes subterráneas 65
5.4. Proyecciones de usos de agua – Demanda potencial 67
5.4.1. Demanda potencial de agua para uso doméstico 67
5.4.2. Demanda potencial de agua para uso agrícola 70
5.4.3. Demanda potencial de agua para uso pecuario 70
5.4.4. Demanda potencial de agua para uso industrial, estético y otros usos 71
6. Escenarios para la Evaluación Regional del Agua 72
7. Modelo WEAP para la Evaluación Regional del Agua 73
7.1. ¿Qué es WEAP? 74

7.2. Modelación del balance hídrico 76
7.3. Construcción del modelo WEAP 78
7.3.1. Elemento unidad hidrológica 78
7.3.2. Elemento río 87
7.3.3. Elemento agua subterránea 88
7.3.4. Elemento sitio de demanda 89
7.3.5. Enlace escorrentía/infiltración 90
7.3.6. Enlace conducción 91
7.3.7. Enlace flujo de retorno 91
7.3.8. Elemento Embalse – Embalse El Guájaro 92
7.3.9. Esquema final en WEAP 96
7.4. Calibración del modelo WEAP ERA-CRA 97
7.5. Resultados del modelo WEAP 101
7.5.1. Escenario natural histórico 101
7.5.2. Proyecciones futuras del escenario natural 108
7.6. Alcances y limitaciones 118
7.7. Recomendaciones y trabajo futuro 119
8. Indicadores de la Evaluación Regional del Agua 121
8.1. Indicadores del Sistema Hídrico Natural 122
8.1.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) 122
8.1.2. Índice de Aridez (IA) 124
8.1.3. Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Aguas Subterráneas (IVICAS) 126
8.2. Indicadores de Presión por Uso del Agua 130
8.2.1. Índice de Uso de Agua Superficial (IUA) 130
8.2.2. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) 132
8.2.3. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público con respecto al número de habitantes (IASAP) 135
8.2.4. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) 138
8.3. Indicadores de Estado de Calidad y Presión por Contaminación 140
8.3.1. Índice de Calidad del Agua (ICA) 141
8.3.2. Índice de Calidad Biológica del Agua – Macroinvertebrados Acuáticos (IMA) 144
8.3.3. Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL) 146
8.4. Indicadores de Riesgo 151
8.4.1. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) 151
8.4.2. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) 154
9. Resultados de la Evaluación Regional del Agua 158
9.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) 158
9.2. Índice de Aridez (IA) 160
9.3. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA) 162
9.4. Índice de Escasez (IE) 165
9.5. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) 168
9.6. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público con respecto al número de habitantes (IASAP) 173
9.7. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) 176
9.8. Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL) 182

9.9. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) 184
9.10. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) 190
9.11. Síntesis de escenarios 193
9.11.1. Escenario de demanda por concesiones 193
9.11.2. Escenario de demanda potencial 196
10. Herramientas de aprendizaje y capacitaciones 200
10.1. Herramienta ERA TOOL R 200
10.2. Plataforma Interactiva ERA CRA ArcGIS Experience 201
10.3. Capacitaciones y Talleres 201
10.3.1. Taller a: Inventario y consolidación de información disponible 202
10.3.2. Capacitación 1: Uso de WEAP 202
10.3.3. Taller b: Validación de datos de entrada al modelo WEAP 202
10.3.4. Capacitación 2: Herramientas ERA TOOL R y ArcGIS Experience 202
10.3.5. Taller c: Validación indicadores ERA en el Atlántico 203
11. Conclusiones y recomendaciones 203
12. Bibliografía 206
13. Anexos 208
13.1. Coberturas y uso de la tierra, suelos y pendientes a escala de subzonas hidrográficas 208
13.2. Parámetros calibrados del modelo ERA-CRA 210
13.3. Población de bovinos y aves por municipio en el Departamento del Atlántico 211
13.4. Capacitaciones y asistencias técnicas 212
13.4.1. Capacitación 1: Uso de WEAP 212
13.4.2. Taller b: Validación de datos de entrada al modelo WEAP 214
13.4.3. Capacitación 2: Herramientas ERA TOOL R y ERA CRA ArcGIS Experience 216
13.4.4. Taller c: Validación indicadores ERA en el Atlántico 218

Figuras

Figura 1. Localización del Departamento del Atlántico. 10
Figura 2. Subzonas POMCA asociadas al Departamento del Atlántico. 11
Figura 3. Elevación del terreno en el Departamento del Atlántico. 12
Figura 4. Pendiente del terreno en el Departamento del Atlántico. 13
Figura 5. Red de drenaje en el Departamento del Atlántico. 14
Figura 6. Distribución espacial de las coberturas y usos de la tierra del Departamento del Atlántico. 16
Figura 7. Distribución espacial de las clasificaciones de los suelos del Departamento del Atlántico. . 17
Figura 8. Distribución espacial de las clasificaciones de las pendientes del suelo del Departamento del Atlántico. 18
Figura 9. Distribución espacial de las unidades hidrogeológicas y sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico. 19
Figura 10. Categorización de zona acuífera y no acuífera en función de la ubicación de los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico. 22
Figura 11. Profundidad desde el terreno a la napa de agua subterránea medida durante el estudio de acuíferos 23
Figura 12. Nivel del agua subterránea calculada a partir de la profundidad medida y el nivel del terreno del mapa de elevación digital. 24
Figura 13. Subcuencas hidrográficas delimitadas para el Departamento del Atlántico en el estudio del Índice de Uso de Agua (CRA, 2013) y en este estudio. 25
Figura 14. Información de caudales en el río Magdalena en Calamar (ID IDEAM 29037020). 28
Figura 15. Estacionalidad diaria de caudales en el río Magdalena en Calamar (ID IDEAM 29037020) en el período 1940 – 2022. 28
Figura 16. Ubicación del embalse El Guájaro. 30
Figura 17. Curva volumen-elevación del embalse El Guájaro respecto al nivel del mar y al fondo del embalse. 31
Figura 18. Niveles medidos en el embalse El Guájaro en el período 2003 – 2022. 33
Figura 19. Ubicación de las estaciones hidro-meteorológicas recopiladas de IDEAM y puntos de con información de niveles de agua subterránea. 34
Figura 20. Número de observaciones diarias en el período 1980 – 2022 en las estaciones hidro-climáticas recopiladas. 34
Figura 21. Estaciones de precipitación y temperaturas con más del 50% de los datos en el período 1980 – 2022. 36
Figura 22. Relación entre variables y condición geográfica y correlación entre variables y estaciones. 36
Figura 23. Diagrama de violín de los estadísticos de ajuste para analizar la representatividad de los productos grillados de clima histórico (1981 – 2020) a los datos observados de precipitación y temperatura. 38
Figura 24. Comparación de series de precipitación y temperatura originales y rellenadas a escala diaria. 40
Figura 25. Comparación de series de precipitación y temperatura originales y rellenadas a escala anual 41
Figura 26. Comparación de la estacionalidad de las series originales y rellenadas. a) Precipitación y b) temperatura. 42
Figura 27. Comparación del patrón de la matriz de correlaciones antes y después del relleno de series. 43
Figura 28. Esquema del formato netcdf. 44
Figura 29. Precipitación promedio multianual distribuida en el Departamento del Atlántico. 44

Figura 30. Temperatura promedio multianual distribuida en el Departamento del Atlántico. 45
Figura 31. Temperatura (arriba) y precipitación (abajo) promedio mensual y agregado anual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico.....45
Figura 32. a) Humedad relativa, b) velocidad del viento a 2 m del suelo y c) fracción nubosa en el Departamento del Atlántico. 47
Figura 33. Mapa conceptual de las narrativas de los escenarios SSP del AR6-IPCC en relación con el nivel de desafíos en torno a mitigación y adaptación. 50
Figura 34. (arriba) Evolución de los cambios proyectados en la temperatura media anual y precipitación total anual para el Departamento del Atlántico y (abajo) relación entre cambios proyectados en temperatura y precipitación en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070. En todos los casos se tomó como referencia el período 1985-2014. 52
Figura 35. Comparación de la estacionalidad, pendiente de la línea de tendencia de la temperatura anual y pendiente de la línea de tendencia de la precipitación anual de los GCM y las observaciones. 55
Figura 36. a) Comparación general de los GCM respecto a las observaciones, b y c) comparación de las proyecciones de los 3 GCM con mejor representatividad de las condiciones locales con las proyecciones promedio del escenario SSP5-8.5 en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respectivamente, respecto al período 1985-2014.....56
Figura 37. Estaciones de calidad de agua consolidadas en la base de datos de calidad de agua en la jurisdicción CRA.....57
Figura 38. Distribución espacial de las concesiones otorgadas por la CRA. 61
Figura 39. Distribución del caudal concesionado en otras fuentes en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico. 62
Figura 40. Distribución del caudal concesionado desde otras fuentes por tipo de uso. 63
Figura 41. Caudal concesionado por tipo de uso desde fuentes superficiales. 63
Figura 42. Presión sobre fuentes superficiales a nivel de subzona hidrográfica. 64
Figura 43. Caudal concesionado por uso en fuentes superficiales para cada subcuenca. 64
Figura 44. Caudal concesionado por tipo de uso de fuentes subterráneas. 65
Figura 45. Presión sobre fuentes subterráneas a nivel de subzona hidrográfica. 66
Figura 46. Caudal concesionado por uso en fuentes subterráneas para cada subcuenca. 67
Figura 47. Línea base para representar la población actual y futura en el Departamento del Atlántico. 68
Figura 48. Proyección de la población en el Departamento del Atlántico periodos 2020 y 2040.....68
Figura 49. Enfoque conceptual de los escenarios para la Evaluación Regional del Agua. 72
Figura 50. Vista esquemática y ejemplo de conectividad de elementos en WEAP. 75
Figura 51. Representación esquemática del método de humedad de suelo de WEAP. 76
Figura 52. Vista esquemática de los elementos unidad hidrológica en WEAP. 79
Figura 53. Ejemplo de estructura interna de la unidad hidrológica CI5. 80
Figura 54. Precipitación promedio multianual en el período 1993 – 2022 para cada unidad hidrológica de WEAP.....83
Figura 55. Temperatura promedio multianual en el período 1993-2022 para cada unidad hidrológica de WEAP.....83
Figura 56. Cambio en la precipitación al 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993-2022. 85
Figura 57. Cambio en la temperatura al 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993-2022. 86
Figura 58. Vista esquemática de los elementos río en WEAP. 87
Figura 59. Vista esquemática de los elementos agua subterránea en WEAP. 88
Figura 60. Vista esquemática de los elementos sitio de demanda en WEAP. 89
Figura 61. Ejemplo de estructura interna de los sitios de demanda. 90

Figura 62. Vista esquemática de los enlaces escorrentía/infiltración en WEAP. (izquierda) Conexión unidad hidrológica-río y (derecha) conexión unidad hidrológica-agua subterránea. 90
Figura 63. Vista esquemática de los enlaces conducción en WEAP. (izquierda) Conexión río-sitio de demanda y (derecha) conexión agua subterránea-sitio de demanda. 91
Figura 64. Vista esquemática de los enlaces flujo de retorno en WEAP. 92
Figura 65. Vista esquemática del elemento embalse en WEAP que representa el embalse El Guájaro 93
Figura 66. Vista de la pestaña de datos para la curva volumen – elevación del elemento embalse que representa el embalse El Guájaro en WEAP. 94
Figura 67. Vista esquemática de la representación de las compuertas y regla de operación del embalse El Guájaro en WEAP. 95
Figura 68. Vista esquemática final del modelo ERA-CRA en WEAP. 96
Figura 69. Diferencia entre el caudal diario medido en la estación Tacamocho (aguas arriba) y Calamar (aguas abajo). 97
Figura 70. Subcuencas aportantes a la ciénaga de Santa Marta consideradas para la calibración de parámetros del modelo ERA-CRA. 98
Figura 71. Comparación de los caudales observados y calibrados en la subcuenca aportante a la estación 2906704. 100
Figura 72. Comparación de los caudales observados y calibrados en la subcuenca aportante a la estación 2906715. 100
Figura 73. Balance hídrico anual del Departamento del Atlántico en el escenario Natural Histórico, período 1993-2022. 101
Figura 74. Balance hídrico promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 1993 – 2002. 103
Figura 75. Evapotranspiración promedio multianual en el período 1993 – 2022. 103
Figura 76. Escorrentía promedio multianual en el período 1993 – 2022. 104
Figura 77. Infiltración promedio multianual en el período 1993 – 2022. 104
Figura 78. (Izquierda) Recarga anual y (derecha) recarga promedio mensual a cada uno de los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico en el período 1993 – 2022. 106
Figura 79. Niveles simulados en el período 1993 – 2022 para el embalse El Guájaro con y sin la regla de operación establecida en el estudio del embalse El Guájaro. 107
Figura 80. Balance hídrico anual del Departamento del Atlántico en el escenario Natural histórico y futuros, período 1993 – 2070. 108
Figura 81. Precipitación promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070. 109
Figura 82. Evapotranspiración promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070. 110
Figura 83. Infiltración promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070. 110
Figura 84. Flujos superficiales promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070. 111
Figura 85. Cambios porcentuales en la evapotranspiración en los periodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070 con respecto al periodo 1993 – 2022. 112
Figura 86. Cambios porcentuales en la escorrentía en los periodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070 con respecto al periodo 1993 – 2022. 113
Figura 87. Cambios porcentuales en la infiltración en los periodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070 con respecto al periodo 1993 – 2022. 114
Figura 88. Niveles simulados en el período (arriba) 2011 – 2040 y (abajo) 2041 – 2070 para el embalse El Guájaro (izquierda) con y (derecha) sin la regla de operación establecida en el estudio del embalse El Guájaro. 118

Figura 89. Cálculo del volumen total y del caudal medio en la curva de duración de caudales. 123
Figura 90. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) en condiciones históricas. 124
Figura 91. Índice de Aridez (IA) en condiciones históricas.....126
Figura 92. Esquemática para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.....128
Figura 93. Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Aguas Subterráneas (IVICAS). 129
Figura 94. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA) en condiciones históricas año medio. 131
Figura 95. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA) en condiciones históricas año seco. 132
Figura 96. Índice de Uso del Agua Subterránea (IEAS) en condiciones históricas año medio.....134
Figura 97. Índice de Uso del Agua Subterránea (IEAS) en condiciones históricas año seco.....135
Figura 98. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Púbico según el número de habitantes (IASAP) en condiciones históricas. 137
Figura 99. Índice Integral de Uso del Agua (IIUA) en condiciones históricas año medio. 139
Figura 100. Índice Integral de Uso del Agua (IIUA) en condiciones históricas año seco. 140
Figura 101. Índice de calidad del Agua (ICA) últimos años de medición en cada estación de calidad. 143
Figura 102. Diagrama de cajas del Índice de calidad del Agua (ICA) para todas las estaciones de monitoreo. 143
Figura 103. Tendencias del Índice de calidad del Agua (ICA) últimos años de medición en cada estación de calidad. 144
Figura 104. Índice de Macroinvertebrados Acuáticos BMWP/Col (IMA). 146
Figura 105. Flujo de trabajo para procesar la información para el Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL). 147
Figura 106. Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua (IACAL) en condiciones históricas año medio 150
Figura 107. Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua (IACAL) en condiciones históricas año seco 151
Figura 108. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condiciones históricas año medio. 153
Figura 109. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condiciones históricas año seco. 153
Figura 110. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) en condiciones históricas. 155
Figura 111. Relaciones para categorizar los distintos componentes del índice morfométrico. 156
Figura 112. Relaciones entre componentes para determinar el índice morfométrico. 157
Figura 113. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) para los tres escenarios de clima. 159
Figura 114. Índice de Aridez (IA) para los tres escenarios de clima. 161
Figura 115. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones. 163
Figura 116. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones. 164
Figura 117. Índice de Escasez (IE) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial. 166
Figura 118. Índice de Escasez (IE) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial. 167
Figura 119. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones. 169
Figura 120. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial. 170
Figura 121. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones. 171

Figura 122. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial. 172
Figura 123. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público respecto al Número de Habitantes (IASAP) para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones. .. 174
Figura 124. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público respecto al Número de Habitantes (IASAP) para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial. 175
Figura 125. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones. 177
Figura 126. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial 178
Figura 127. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y de demandas por concesiones. 179
Figura 128. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial 181
Figura 129. Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL) para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial 183
Figura 130. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones. 185
Figura 131. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial. 186
Figura 132. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condiciones de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones. 188
Figura 133. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial. 189
Figura 134. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) para los tres escenarios de clima y demanda por concesiones. 191
Figura 135. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial. 192
Figura 136. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demandas por concesiones - Análisis general. 194
Figura 137. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demandas por concesiones - Análisis sobre fuentes superficiales para escenarios de cambio climático 2011 - 2040 y 2041 – 2070. 195
Figura 138. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demandas por concesiones - Análisis sobre fuentes subterráneas para clima histórico y escenario cambio climático 2011-2040. 195
Figura 139. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demandas por concesiones - Análisis sobre fuentes subterráneas para escenario cambio climático 2041-2070. 196
Figura 140. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis general, clima histórico. 196
Figura 141. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis general, escenarios de cambio climático 2011 - 2040 y 2041 – 2070. 197
Figura 142. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis sobre fuentes superficiales para escenarios de cambio climático 2011 - 2040 y 2041 – 2070. 198
Figura 143. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis sobre fuentes subterráneas para clima histórico y escenario cambio climático 2011-2040 199
Figura 144. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis sobre fuentes subterráneas para escenario cambio climático 2041-2070. 199

Tablas

Tabla 1. Fuentes de información utilizadas para el desarrollo de la Evaluación Regional del Agua. 9
Tabla 2. Categorías de coberturas y usos de la tierra del Departamento del Atlántico. 15
Tabla 3. Presencia de las clasificaciones de suelo del Departamento del Atlántico.....17
Tabla 4. Presencia de las clasificaciones de las pendientes del suelo del Departamento del Atlántico.....18
Tabla 5. Caracterización de las unidades hidrogeológicas del Departamento del Atlántico.....20
Tabla 6. Presencia de las unidades hidrogeológicas del Departamento del Atlántico. 21
Tabla 7. Unidades hidrogeológicas que componen cada sistema acuífero. 21
Tabla 8. Equivalencia de las subcuencas delimitadas en este estudio (ERA) y en el estudio del Índice de Uso del Agua (IUA). 25
Tabla 9. Comparación de áreas de las subcuencas delimitadas en este estudio (ERA) y en el estudio del Índice de Uso del Agua (IUA). 26
Tabla 10. Parámetros morfométricos de las subcuencas delimitadas en este estudio.....27
Tabla 11. Resumen de la regla de operación del embalse, vigente desde 2012. 32
Tabla 12. GCM del AR6-IPCC y escenarios analizados. 51
Tabla 13. Desglose de las proyecciones en temperatura y precipitación en los períodos 2011-2040y 2041-2070. 53
Tabla 14. Funciones objetivo para el análisis de representatividad de los GCM.....54
Tabla 15. Módulos de consumo para concesiones CRA. 59
Tabla 16. Concesiones de Agua en el río Magdalena, embalse El Guájaro y canal del Dique. 60
Tabla 17. Caudal Concesionado por Tipo de Uso para Otras Fuentes 62
Tabla 18. Módulos de consumo para cultivos permanentes, transitorios y mixtos. 70
Tabla 19. Número total de Bovinos y Aves en el Atlántico, año 2022. 71
Tabla 20. Módulos de consumo para bovinos y aves en el Departamento del Atlántico. 71
Tabla 21. Síntesis de los escenarios a evaluar en la Evaluación Regional del Agua.....73
Tabla 22. Descripción de parámetros del método de humedad de suelo. 77
Tabla 23. Resumen de las categorías de zonas acuíferas, cobertura y uso de la tierra, suelo y pendiente. 80
Tabla 24. Ejemplo de la subdivisión interna de áreas para la unidad hidrológica CI5 con la convención incorporada en WEAP. 81
Tabla 25. Estructura para el cálculo de parámetros del método de humedad de suelo para cada categoría de la subdivisión de las unidades hidrológicas en WEAP. 82
Tabla 26. Presencia de las distintas clasificaciones de pendiente y elevación promedio del terreno en las subcuencas del Departamento del Atlántico y las potenciales subcuencas para la calibración del modelo ERA-CRA. 99
Tabla 27. Resumen de los parámetros del método de humedad de suelo calibrados.....100
Tabla 28. Promedio y desviación estándar de los flujos anuales del balance hídrico del Departamento del Atlántico en el período 1993 – 2022. 102
Tabla 29. Promedio y desviación estándar de los flujos mensuales del balance hídrico de las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 1993-2022. 105
Tabla 30. Resumen de los caudales diarios simulados en los elementos ríos de WEAP en el período 1993 – 2022. 105
Tabla 31. Promedio y desviación estándar de la recarga anual a los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico en el período 1993 – 2022. 106
Tabla 32. Cambios proyectados de los flujos anuales del balance hídrico del Departamento del Atlántico para los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022. 108

Tabla 33. Cambios proyectados en las componentes del balance hídrico anual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 2011 – 2040, respecto al período 1993 – 2022. 114
Tabla 34. Cambios proyectados en las componentes del balance hídrico anual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022. 115
Tabla 35. Cambios proyectados para los caudales diarios simulados en los elementos ríos de WEAP en el período 2011 – 2040, respecto al período 1993 – 2022. 115
Tabla 36. Cambios proyectados para los caudales diarios simulados en los elementos ríos de WEAP en el período 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022. 116
Tabla 37. Cambios proyectados en la recarga anual a los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2071, respecto al período 1993 – 2022..... 117
Tabla 38. Categorías para la evaluación del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH). 123
Tabla 39. Categorías para la evaluación del Índice de Aridez (IA). 125
Tabla 40. Categorías del Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Aguas Subterráneas (IVICAS). 129
Tabla 41. Categorías para la evaluación del Índice de Uso del Agua Superficial (IUA). 131
Tabla 42. Categorías para la evaluación del Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS). 133
Tabla 43. Categorías para la evaluación del Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público (IASAP)..... 136
Tabla 44. Categorías para la evaluación del Índice Integral del Uso del Agua (IIUA). 138
Tabla 45. Parámetros de calidad de agua incluidos en el Índice de Calidad del Agua (ICA) y su función de transformación..... 141
Tabla 46. Categorías para la Evaluación del Índice de Calidad del Agua (ICA). 142
Tabla 47. Clasificación del Índice de Calidad Biológica del Agua – Macroinvertebrados Acuáticos (IMA). 145
Tabla 48. Puntajes de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Col. 145
Tabla 49. Categorías y descriptores de presión por subcuenca de acuerdo con el cociente de carga (ton/año) /oferta total (hm^3). 148
Tabla 50. Clasificación y descriptor del Índice de Alteración Potencial a la Calidad de Agua (IACAL)..... 148
Tabla 51. Cargas unitarias estimadas por actividad económica. 149
Tabla 52. Categorías para la clasificación del Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH). 152
Tabla 53. Matriz de decisión para la clasificación del Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET). 155
Tabla 54. Clasificación del índice de variabilidad. 158
Tabla 55. Categorías de análisis de los indicadores de la ERA por escenario y subcuenca. 193
Tabla 56. Categorías de coberturas y usos de la tierra del Departamento del Atlántico desagregado por subzona hidrográfica. 208
Tabla 57. Presencia de las clasificaciones de suelo del Departamento del Atlántico, desagregado por subzona hidrográfica..... 209
Tabla 58. Presencia de las clasificaciones de las pendientes del suelo del Departamento del Atlántico, desagregado por subzona hidrográfica. 209
Tabla 59. Parámetros resultantes del proceso de calibración del modelo ERA-CRA. 210
Tabla 60. Población Bovinos y Aves en el Departamento del Atlántico para el año 2022 211

Resumen ejecutivo

La Evaluación Regional del Agua (ERA) del Departamento del Atlántico, desarrollado para la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) en convenio con el Instituto de Ambiente de Estocolmo SEI, compila la caracterización del sistema hídrico y evaluación de sus condiciones con base en indicadores, siguiendo la metodología propuesta por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La ERA es un análisis del estado actual y tendencias del sistema hídrico que busca facilitar la gestión y toma de decisiones en torno al recurso hídrico por parte la C.R.A. Este análisis se basa en una herramienta analítica que permita cuantificar el estado del sistema hídrico en el Departamento del Atlántico.

La ERA en Colombia fue definida en el Decreto 1640 de 2012, donde se dio un plazo de tres años a partir del año 2013, año en el que el IDEAM expidió la metodología de la ERA, para que las Corporaciones la implementaran. Mediante la resolución 328 del 25 de abril de 2023, la CRA decidió realizar la ERA en su Departamento con el Instituto de Ambiente de Estocolmo (SEI; Stockholm Environment Institute) en un plazo de 8 meses sin superar el 31 de diciembre de 2023.

Para el desarrollo de la ERA, se empleó una herramienta de modelación hidrológica y planificación de recursos hídricos, conocida como valuación y Planeación del Agua (WEAP por sus iniciales en inglés) desarrollado por SEI (Yates et al., 2005a). Esta herramienta permite recopilar información sobre oferta, demandas, calidad y vulnerabilidad de los recursos hídricos, así como simular distintos 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.

Este convenio, además de la implementación de la ERA en el Departamento del Atlántico, incluye el desarrollo de dos herramientas de planificación denominadas ERA TOOL R y ERA CRA ArcGIS Experience. Estas herramientas de visualización sintetizan los resultados de la ERA de una manera más amigable con cualquier usuario permitiendo una toma de decisiones más informada. Estas herramientas fueron transferidas a la corporación mediante una capacitación donde se explicó su uso, actualización y requerimientos computacionales.

Este informe se divide en 11 secciones las cuales resumen el desarrollo general de la ERA en el Atlántico:

- **Sección 1: Introducción y objetivos del estudio**

En esta sección se introduce el estudio desarrollado, además del objetivo general y objetivos específicos.

- **Sección 2: Fuentes de información**

En esta sección se presenta una visión general de la información utilizada para el desarrollo de este estudio.

Dentro de las fuentes de información provista en este estudio destaca la información provista por la CRA, incluyendo bases de datos geoespacial e informes técnicos; información proporcionada por IDEAM, principalmente información hidro-climática; información recopilada desde bases de datos públicas de distintas entidades tanto colombianas como internacionales.

- **Sección 3: Caracterización del área de estudio**

En esta sección se caracteriza el medio físico, la infraestructura relevante y el clima en el Departamento del Atlántico.

El Departamento del Atlántico cubre una superficie de 3,321.2 km^2 y se ubica en el borde costero norte de Colombia, delimitado por los Departamentos de Bolívar y Magdalena al poniente y oriente, respectivamente, el mar Caribe al norte y la derivación del río Magdalena hacia el canal del Dique al sur. Administrativamente, el Departamento del Atlántico abarca 23 municipios, 4 subzonas hidrográficas (POMCA) y el embalse El Guájaro.

El Departamento del Atlántico se encuentra entre 0 y 530 m.s.n.m, con pendientes entre 0 y 1,600% (0 y 86.4 grados). En general, el terreno es plano, con una zona montañosa que bordea el embalse El Guájaro, generando la divisoria de las 4 subzonas hidrográficas. Los escurrimientos superficiales en el Departamento del Atlántico siguen 3 direcciones principales: 1) hacia el río Magdalena (subzona Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe y subzona y Ciénaga de Mallorquín), 2) hacia el embalse El Guájaro (subzona Canal del Dique) y 3) hacia el mar Caribe (subzona Arroyos Directos al Caribe).

Respecto a las coberturas y usos de la tierra, estas se agruparon en 8 categorías (agrícola, área abierta, bosque, cultivos permanentes, cultivos transitorios, minería, pasto y superficie de agua), de las cuales, las categorías pasto (48.8%), bosque (24.8%), cuerpo de agua (8.5%) y agrícola (7.9%) cubren un 90.0% de la superficie total. Respecto al suelo, este se clasificó en 6 categorías en base a la textura general (fino, moderado, grueso, zona urbana, cuerpo de agua y no definido), de las cuales las categorías moderado (43.3%), fino (30.5%) y grueso (15.0%) cubren un 88.8% de la superficie total. Respecto a la caracterización geológica, existen 10 unidades geológicas e hidrogeológicas en el Departamento del Atlántico, sin embargo, estas están agrupadas en 5 tipos de porosidad: sedimentos permeables, sedimentos poco permeables, rocas permeables, rocas poco permeables y sedimentos y rocas impermeables. Las zonas previamente clasificadas como sistemas acuíferos comprenden un 52% de la superficie total. Respecto a las subcuencas hidrográficas existentes dentro del Departamento del Atlántico, se realizó una nueva delimitación que aproximara lo más posible las subcuencas previamente utilizadas por la CRA, con el objetivo de poder tener de respaldo todos los insumos necesarios para una potencial actualización o reevaluación. Esta delimitación resultó en 26 subcuencas para el Departamento del Atlántico que se codificaron de forma análoga a las usadas de referencia.

El Departamento del Atlántico cuenta con 3 fuentes de agua externas a las subcuencas hidrográficas que están dentro de la delimitación del Departamento: río Magdalena, embalse El Guájaro y canal del Dique. El río Magdalena fluye de sur a norte, con su cabecera en el Departamento del Huila y desembocadura en el mar Caribe en el borde oriental del Departamento del Atlántico, con un área de drenaje de aproximadamente 250,000 km^2 y caudal medio en su desembocadura de 7,400 m^3/s. El río Magdalena como fuente de abastecimiento de agua es considerado como una fuente inagotable, comparada con los usos de agua dentro del Departamento del Atlántico. El embalse El Guájaro, por otra parte, se formó por la modificación de alrededor de 90 km^2 del plano inundable del río Magdalena, resultando en un espejo de agua del embalse de 160 km^2. La capacidad de almacenamiento del embalse es de 400,000,000 m^3 al momento de tener una profundidad de 4.25 m o un nivel de 4.80 m.s.n.m. Sin embargo, la existencia de diques perimetrales permite que el embalse pueda almacenar mayores volúmenes de agua. El embalse El Guájaro es regulado por dos compuertas que controlan los flujos entre el embalse y el canal del Dique (con un caudal que no supera los 200 m^3/s), por la escorrentía generada en las subcuencas aportantes al embalse y la diferencia entre la

evaporación y la precipitación local. La operación del embalse El Guájaro no responde únicamente al control de inundaciones o abastecimiento de agua, sino que también a la migración de peces, por lo que su regulación no puede ser mecanizada sin supervisión. El canal del Dique no se caracterizó debido a que se regula de forma externa a la CRA.

Dado que la CRA no cuenta con información hidro-climática, se solicitó esta información a IDEAM. En el Departamento del Atlántico la información hidro-climática disponible es limitada. Espacialmente, las estaciones de brillo solar, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura se distribuyen cerca de los límites del Departamento. Por otro lado, las estaciones de precipitación presentan una mayor distribución dentro del Departamento. Respecto a las estaciones de caudales, estas se encuentran en los límites del Departamento del Atlántico, a lo largo del canal del Dique y en el río Magdalena, previo a la canalización del canal del Dique (estación Calamar). No hay información de caudales en los arroyos o causes superficiales existentes dentro del Departamento del Atlántico. En términos de continuidad temporal de los registros, hay intermitencia en la recolección de datos y son pocos los días donde se tiene información en todas las estaciones.

A partir de la información recopilada, se generó una regionalización tanto de precipitación como temperaturas, abarcando el período 1980-2022 a escala diaria y toda la superficie del Departamento del Atlántico con una resolución de 1 km. Respecto a las temperaturas medias, en el Departamento del Atlántico estas están entre los 27.5 y 29.0 °C, siendo localmente el sector nor-oriente el más cálido del Departamento y el extremo norte y sector poniente los menos cálidos. Respecto a la precipitación anual, en el Departamento del Atlántico esta toma valores entre los 600 y 1,300 mm/año, siendo localmente el sector al norte del embalse El Guájaro el con mayores precipitaciones del Departamento y el extremo norte el con menores precipitaciones. Para la humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar, se consideró una caracterización única para toda la extensión del Departamento en base a promedios diarios multianuales. Respecto a la humedad relativa, los promedios diarios oscilan entre 76 y 86%, siendo marzo el mes menos húmedo y octubre el más húmedo. Caso contrario ocurre con la velocidad del viento, donde los vientos más fuertes ocurren en marzo con promedios diarios de 3.5 m/s y los más suaves ocurren en octubre con promedios diarios de 1.75 m/s. Por otro lado, el brillo solar se transformó en fracción nubosa y los resultados muestran que los valores más bajos, cercanos a 0.45, ocurren en mayo (días menos soleados) y los más altos, cercanos a 0.7, en enero (días más soleados).

Adicional a la caracterización climática histórica, se analizó la información del sexto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas (AR6-IPCC), definiéndose el modelo climático MPI-ESM1-2-HR como el más representativo de las condiciones locales históricas, modelo que se utilizó bajo el escenario SSP5-8.5 para el análisis de proyecciones futuras para la ERA. En general, las proyecciones del AR6-IPCC, respecto al período 1985-2014, indican aumentos de temperatura de 0.6 °C y entre 1.1 y 2.0 °C para los períodos 2011-2040 y 2041-2070, respectivamente y cambios en precipitación entre disminución en un 2.6% y aumento en un 1.4% para el período 2011-2040 y disminución en un 14.1% y aumento en 0.7% para el período 2041-2070. El modelo MPI-ESM1-2-HR en el escenario SSP5-8.5, respecto al período 1993-2022, indica un aumento en temperaturas de 0.4°C y una disminución en precipitación en un 1.3% en el período 2011-2040 y aumento en temperaturas de 1.3 °C y disminución de la precipitación en un 11.9% en el período 2041-2070.

- **Sección 4: Calidad del agua**

En esta sección se presenta el procesamiento de la información que caracteriza la calidad de agua en el Departamento del Atlántico. Para ello se usó información de tres instituciones que están realizando monitoreos en la región: IDEAM, Convenio Cormagdalena, y CRA. El IDEAM cuenta con seis estaciones

en las que se encuentran monitoreando la calidad del agua desde el año 2000 al año 2022, monitoreando 101 parámetros con 2,572 registros. El Convenio Cormagdalena cuenta con 4 estaciones de calidad de agua, con 38 propiedades observadas y 203 mediciones de calidad de agua. Por su parte la CRA cuenta con 260 diferentes puntos de medición que se consolidaron en 25 estaciones de calidad de agua, donde se han medido parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos, e hidrobiológicos. La cantidad de mediciones realizadas por la CRA asciende a 28,243 mediciones.

En el Departamento del Atlántico, se han establecido objetivos de calidad de agua para todos los cuerpos lénticos y lóticos. Para ello, se han clasificado de acuerdo con los usos del agua usando Clases. Las clases varían desde la más restrictiva, Clase 1, que corresponde a los valores de los usos del agua para consumo humano y doméstico con tratamiento convencional, preservación de flora y fauna, uso agrícola y uso pecuario, hasta la Clase 5, que corresponde a valores de los usos para asimilación de materia orgánica, uso industrial restringido y recuperación para paisajismo. Los parámetros para los que se ha establecido metas de calidad de agua son parámetros orgánicos y bacteriológicos, nutrientes, sólidos y parámetros de interés sanitario.

- **Sección 5: Usos de agua – Demanda**

En esta sección se presenta el procesamiento de la información de concesiones de la CRA y su categorización en función del uso y fuentes. Adicionalmente, se propone una estimación de los usos del agua en el Departamento del Atlántico enfocada en capturar potenciales usos y posibles usuarios no reglamentados.

El procesamiento de las concesiones consideró en una primera instancia un filtro donde se descartaron aquellas que 1) carecían de coordenadas del punto de captación, no tenían un valor de caudal asignado o tenían clasificación de fuente de captación como reuso o aguas lluvia, 2) estaban duplicadas y correspondientes a renovaciones o modificaciones, manteniendo únicamente la última concesión vigente, 3) en talleres con la CRA se indicó que no eran correctas. A partir de estas consideraciones, se descartaron un total de 59 concesiones, obteniendo un total de 420 concesiones reglamentadas y validadas por la CRA. Es importante mencionar que en este estudio no se consideraron las concesiones otorgadas dentro del casco urbano de Barranquilla, las cuales maneja Barranquilla verde. Únicamente se consideraron las concesiones reglamentadas por la CRA.

Para la categorización por uso, se tuvo que completar la información en base a relaciones entre la información disponible y módulos de consumo estimados a partir de resoluciones de la CRA y Cormagdalena. Para las 420 concesiones se consideraron los siguientes usos: doméstico municipal, doméstico rural, pecuario, agrícola, pesca, estético, industrial y otros. Para la categorización por fuente, se diferenció entre concesiones de agua asociadas al río Magdalena, canal del Dique y embalse El Guájaro y concesiones asociadas a otras fuentes de agua, tanto superficiales como subterráneas, dentro de los límites del Departamento del Atlántico.

Desde el río Magdalena, canal del Dique y embalse El Guájaro, las concesiones suman 59,818.1, 450.8 y 11,326.5 l/s, respectivamente. Esto, sin considerar los 4,000,000 l/s otorgados en una concesión de uso de pesca de jaulas dentro del embalse El Guájaro. Respecto a otras fuentes, 576.5 l/s corresponden a concesiones desde fuentes superficiales y 1,094.4 l/s a concesiones desde fuentes subterráneas. De todas las subcuencas del Departamento del Atlántico, en 4 no hay concesiones de fuentes superficiales ni subterráneas asignadas: CA2 – Arroyo Trébol y CA7 – Galerazamba, pertenecientes a la subzona Caribe, CI5 – Perdida Cantera, perteneciente a la subzona de Mallorquín y MA11 – Ciénaga Uvero 2, perteneciente a la subzona Magdalena. Respecto a los distintos usos del agua desde las otras fuentes, tanto fuentes superficiales como subterráneas, estas se distribuyen en

un 25% agrícola, 19% industrial, 15% pecuario, 13% estético, 13% otros, 6% doméstico rural, 5% pesca y 4% doméstico municipal.

Las proyecciones de usos de agua o demanda potencial se estimaron en base a las coberturas de uso de la tierra y módulos de consumo, además de proyecciones de la población a partir del Censo nacional de población y vivienda, realizado por el DANE el año 2018, y otros catastros como el censo agropecuario del 2022 para aves y bovinos del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Estas proyecciones se estimaron para todos los usos, excepto para uso industrial, estético y otros, debido a que no se cuenta con información de los módulos de consumo para estos usos, o con estudios sociales y económicos que determinen el cambio futuro en el consumo del recurso hídrico para estos sectores en el Departamento del Atlántico.

- **Sección 6: Escenarios para la Evaluación Regional del Agua**

En esta sección se presentan los escenarios o condiciones bajo las cuales se evaluó la ERA en el Departamento del Atlántico.

Se consideraron 3 períodos de tiempo: un período histórico, considerando los últimos 30 años (1993 – 2022), un futuro cercano, abarcando los años 2011 – 2040, y un futuro lejano, abarcando los años 2041 – 2070. La caracterización climática de los períodos corresponde a la información histórica regionalizada para el Departamento y una proyección de cambio climático en base al modelo MPI-ESM1-2-HR SSP5-8.5 del AR6-IPCC. Para cada uno de estos períodos se consideraron 3 condiciones de demandas o usos de agua: natural o sin demandas, demandas por concesiones, demandas potenciales. Esto resultó en una combinación de 9 escenarios.

- **Sección 7: Modelo WEAP para la Evaluación Regional del Agua**

En esta sección se presenta la herramienta de modelación de recursos hídricos, desarrollada en WEAP, utilizada para la ERA. Adicionalmente, se presentan los principales resultados del balance hídrico en el escenario natural y recomendaciones de trabajo futuro en torno a esta herramienta. Esta herramienta no modela calidad de agua, debido a que no se contó con información de monitoreos de calidad de agua enfocado en representar los procesos de transporte y destino de la contaminación.

WEAP es una plataforma computacional basada en SIG para la modelación integrada de los factores biofísicos y socioeconómicos que determinan la disponibilidad espacial y temporal de agua en una cuenca. Como herramienta de modelación de recursos hídricos, WEAP es un modelo semi-distribuido, que permite calcular el balance hídrico de forma concentrada y representar el ruteo y distribución de agua en distintas zonas a lo largo del área de estudio en función de las necesidades y usos considerados. WEAP es forzado principalmente por información climática y de demandas, lo que es idóneo para poder analizar distintas medidas de gestión y evaluar la incertidumbre asociada a condiciones climáticas futuras.

El modelo desarrollado en este estudio, el modelo ERA-CRA, considera el método de humedad de suelo para el cálculo del balance hídrico. Este método permite representar procesos de evapotranspiración y escorrentía tanto superficial como subsuperficial y desde la zona profunda. Estos flujos son regulados por el nivel de humedad del suelo y las condiciones climáticas, lo que permite representar la memoria que tiene la acumulación del agua en el sistema.

La caracterización de las unidades hidrológicas del modelo ERA-CRA corresponden a la caracterización presentada en la sección 3 para el medio físico y 5 para los usos de agua. Dado que no hay información de caudales medidos dentro del Departamento del Atlántico para poder calibrar los parámetros del

método de humedad de suelos, se construyó un modelo de un área externa al Departamento siguiendo una metodología equivalente a la construcción del modelo ERA-CRA. Los parámetros calibrados se asignaron para cada una de las caracterizaciones del modelo ERA-CRA, permitiendo estimar un primer balance hídrico integrado en el Departamento. Los resultados del modelo ERA-CRA calibrado, revisados en talleres con la CRA, mostraron consistencia con las observaciones cualitativas de caudales superficial y niveles del embalse El Guájaro.

El balance hídrico en régimen natural (sin demandas) para el período 1993-2022 en el Departamento del Atlántico muestra que la evapotranspiración, infiltración al sistema subterráneo y flujos superficiales corresponden a un 65, 13 y 21% de las precipitaciones totales. En cuanto a las proyecciones de cambio climático, se observa que, ante una disminución en precipitación y aumento en temperaturas, la demanda evapotranspirativa aumenta, por lo que la evapotranspiración no disminuye en la misma proporción que las precipitaciones. Esto resulta en que la infiltración y flujos superficiales presentan disminuciones mayores que la disminución en precipitación, lo que es importante a considerar en caso de períodos de sequía que puedan resultar en una disminución abrupta de la disponibilidad hídrica dentro del Departamento. En esta sección también se presentan estadísticos relevantes de los caudales diarios de cada uno de los cauces superficiales representados en el modelo ERA-CRA, junto a un detalle de la recarga a cada uno de los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico.

Es importante considerar que no se tuvo acceso a información de caudales para realizar una calibración de los parámetros del modelo ERA-CRA y que esta calibración consideró información externa al Departamento. El levantamiento de información de caudales superficiales dentro del Departamento debe ser considerado prioritario para disminuir incertidumbres, además de mantener la herramienta en constate revisión y actualización.

- **Sección 8: Indicadores de la Evaluación Regional del Agua**

En esta sección se presentan las características de los indicadores evaluados en la ERA y las consideraciones tanto para su cálculo como su evaluación, además de resultados en condiciones históricas para ejemplificar los tipos de resultados. Estos indicadores corresponden a los propuestos por el IDEAM y se agrupan en Indicadores del Sistema Hídrico Natural, Indicadores de Presión por Uso del Agua, Indicadores de Estado de Calidad y Presión por Contaminación e Indicadores de Riesgo.

- **Sección 9: Resultados de la Evaluación Regional del Agua**

En esta sección se presentan los principales resultados de la ERA en el Departamento del Atlántico, junto a una categorización crítica en base a umbrales definidos para cada uno de los indicadores.

Los resultados de los indicadores de la ERA muestran que la subcuenca CI6 – Plano Costero, ubicada en la subzona Mallorquín, es la que resultó en la situación más crítica dentro del Departamento del Atlántico para todos los indicadores, considerando tanto fuentes superficiales como subterráneas, y en los tres períodos analizados. Análogamente, pero solo para condiciones con demandas potenciales, resultaron en condiciones críticas las subcuencas CI2- Oriental Pan de Azúcar y MA2 – Ciénaga de Malambo.

En cuanto a aguas superficiales, al considerar únicamente demandas por concesiones en el período histórico, ninguna subcuenca presentó una situación crítica. Caso contrario, en cuanto a aguas subterráneas, al considerar únicamente demandas por concesiones en el período histórico, la subcuenca MA3 – Ciénaga El Concento resultó en una condición crítica.

Dado que el escenario climático analizado en este estudio presenta una disminución en la disponibilidad hídrica, los indicadores calculados en los períodos futuros resultaron en una degradación en los indicadores respecto al período histórico. En particular, para el escenario de demandas por concesiones resultó en 2 subcuencas adicionales en una situación crítica y para el escenario de demandas potenciales se suman 6 subcuencas a esta categoría.

- **Sección 10: Herramientas de aprendizaje y capacitaciones**

En esta sección se presentan las dos herramientas de visualización e interacción desarrolladas durante este estudio. Adicionalmente, se mencionan las capacitaciones y talleres, junto a sus objetivos, llevados a cabo en conjunto y para la CRA en torno al desarrollo de la ERA.

La primera herramienta de visualización e interacción es la ERA TOOL R, la cual es una herramienta técnica de apoyo a los tomadores de decisiones para analizar los indicadores de la ERA en las diferentes subcuencas mediante mapas y gráficos. Por otro lado, la herramienta ERA CRA ArcGIS Experience es una herramienta visual y estéticamente más agradable y amigable que puede mostrarse y presentarse ante cualquier tipo de público al mostrar el resultado de los indicadores de manera espacial mediante mapas interactivos. Ambas herramientas fueron presentadas a los integrantes de la CRA, junto a una capacitación en su uso y actualización.

Respecto a los talleres, se realizaron talleres de un día cada uno para validar la información recopilada y procesada, validar el modelo ERA-CRA calibrado, junto a los escenarios y demandas de agua y validar los indicadores calculados con el modelo ERA-CRA. Respecto a las capacitaciones, se realizaron capacitaciones de un día cada uno para traspasar conocimientos técnicos respecto a la herramienta WEAP y de las herramientas ERA TOOL R y ERA CRA ArcGIS Experience.

- **Sección 11: Conclusiones y recomendaciones**

En esta sección se presentan las principales conclusiones del estudio a partir de los resultados de las secciones previas y recomendaciones respecto al uso de los resultados y herramientas desarrolladas.

Se sugiere que los resultados de los indicadores sean utilizados para priorizar acciones en un corto plazo que busquen resolver las urgencias y objetivos locales en el Departamento del Atlántico. Se sugiere también que futuras decisiones sean apoyadas por el modelo ERA-CRA, desarrollado en este estudio, y así cuantificar potenciales incertidumbres y explorar distintas condiciones que permitan lograr los objetivos de la manera más sostenible posible. Por otro lado, las herramientas de visualización e interacción serán de gran apoyo para explorar los índices de la ERA por los equipos técnicos, además de poder divulgar esta información con actores locales u otros interesados.

1. Objetivos del estudio

El objetivo principal de este convenio es la implementación de la ERA para el Departamento del Atlántico a través de la actualización de sus diferentes indicadores por medio de la implementación del modelo WEAP. Para el cumplimiento de este objetivo principal se plantearon los siguientes tres objetivos:

Objetivo 1: Compilar una base de datos de la información del recurso hídrico respecto a la oferta, demanda, calidad y vulnerabilidad.

En la sección 2 se presentan las fuentes de información consultadas para el desarrollo de la ERA en el Atlántico. A lo largo de este informe se presenta de manera más detallada el procesamiento de esta información. Los resultados obtenidos fueron discutidos y aprobados por la CRA mediante el taller realizado el día 27 de julio de 2023.

Objetivo 2: Determinar el estado actual y las tendencias del recurso hídrico en el área de cuatro subzonas hidrográficas en jurisdicción de la CRA, utilizando WEAP como plataforma para determinar los indicadores definidos en la metodología del IDEAM para la ERA. Incluir el indicador de escasez siguiendo las recomendaciones de la CRA.

Para cumplir con este objetivo se construyó un modelo en la plataforma WEAP para el Departamento del Atlántico a partir de la información histórica recopilada en el objetivo 1. Más detalle del desarrollo de este modelo se presenta en la sección 7. Adicionalmente, en el modelo se incorporaron diversos escenarios relacionados con el cambio climático regional, el crecimiento de la población y la demanda de agua los cuales se van presentando a lo largo de este informe y se resumen en la sección 6.

Con el fin de que el personal de la CRA tenga las capacidades para el uso general y manejo de WEAP, el día 1 de noviembre de 2023 se realizó un entrenamiento de la herramienta explorando las funcionalidades básicas del software, la exploración de escenarios y visualización de resultados. Una vez entendiendo el funcionamiento general de WEAP, el día 2 de noviembre de 2023 se realizó un taller de validación de la construcción del modelo con su respectiva calibración y escenarios a incluir los, cuales fueron aprobados por la CRA.

Una vez validado el modelo, se calcularon los indicadores de la ERA en el Atlántico para los diferentes escenarios modelados. Los resultados de los indicadores se presentan en las secciones 8 y 9 de este documento.

Objetivo 3: Capacitar a los funcionarios de la CRA en el manejo de WEAP y el modelo implementado en el área de estudio y la herramienta de visualización de los indicadores del recurso hídrico. Socializar los resultados de la ERA a otros miembros de la CRA y posibles interesados en la ERA.

Los días 27 y 28 de noviembre de 2023 se realizaron capacitaciones y talleres que incluyeron la socialización y validación de indicadores ERA así como la transferencia de conocimiento del modelo WEAP y las herramientas de visualización construidas. En la sección 10 se describe a mayor detalle las herramientas construidas y las capacitaciones y talleres realizados con los funcionarios de la corporación.

2. Fuentes de información

En esta sección se presentan las fuentes de información utilizadas para el desarrollo de la Evaluación Regional del Agua (ERA) para la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA). La principal fuente de información corresponde a la CRA, sin embargo, también se tuvo acceso a información pública de instituciones públicas colombianas e instituciones internacionales. La Tabla 1 presenta un resumen de la información utilizada.

Tabla 1. Fuentes de información utilizadas para el desarrollo de la Evaluación Regional del Agua.

Categoría	Descripción	Fuente
Mapa de elevación digital	Mosaico del modelo de Elevación Digital obtenido a partir del producto "Mazpen terrain tiles" en Land Viewer aplicando 14 zooms. Se descargaron 1763 imágenes (2500 x 2500 m c/u) con una resolución de 5m y se construyó el mosaico del área de estudio.	Producto de descarga libre (https://eos.com/landviewer/)
Coberturas y usos de la tierra	Polígonos de coberturas de la tierra, compartido por la CRA. Reinterpretación de cobertura y usos de la tierra generada con metodología Corine Land Cover en base a imágenes Landast 8 del año 2018. Escala 1:100.000.	Corporación Autónoma Regional del Atlántico – CRA Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM
Suelos	Estudio de suelos de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico a partir de la información del estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Atlántico (IGAC, 2007). Información vectorial del estudio de suelos de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.	Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA
Geología e hidrogeología	Diagnóstico preliminar de los acuíferos del Departamento del Atlántico en el marco de la elaboración de los planes de manejo de acuíferos. Entregable 3.	Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA
Concesiones de agua	Base de datos en Excel con información general sobre los permisos de agua otorgados por la CRA.	Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA
Información climatológica	Valores medios diarios históricos de precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y brillo solar.	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM
Calidad de agua	Muestreos de calidad de agua en cuerpos lóticos y lénticos Estudios hidrobiológicos en cuerpos de agua lénticos	Corporación Autónoma Regional del Atlántico – CRA Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM Convenio Cormagdalena
Escenarios cambio climático	Resultados de los modelos de circulación general del sexto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Considera variables de precipitación acumulada y temperatura media mensual.	Panel Intergubernamental de Cambio Climático - IPCC

Fuente: Elaboración propia a partir de múltiples fuentes.

Es importante mencionar que, en instancias preliminares se utilizó información adicional a la presentada en la Tabla 1; sin embargo, debido a su poca representatividad de las condiciones locales,

esta se descartó. El detalle y análisis de esta información descartada escapa a los objetivos de este estudio, por lo que no se presentan aquí, pero se mencionan en las respectivas secciones.

3. Caracterización del área de estudio

El Departamento del Atlántico cubre una superficie de 3,321.2 km^2 y se ubica en el borde costero norte de Colombia, delimitado por los Departamentos de Bolívar y Magdalena al poniente y oriente, respectivamente, el mar Caribe al norte y la derivación del río Magdalena hacia el canal del Dique al sur (Figura 1).

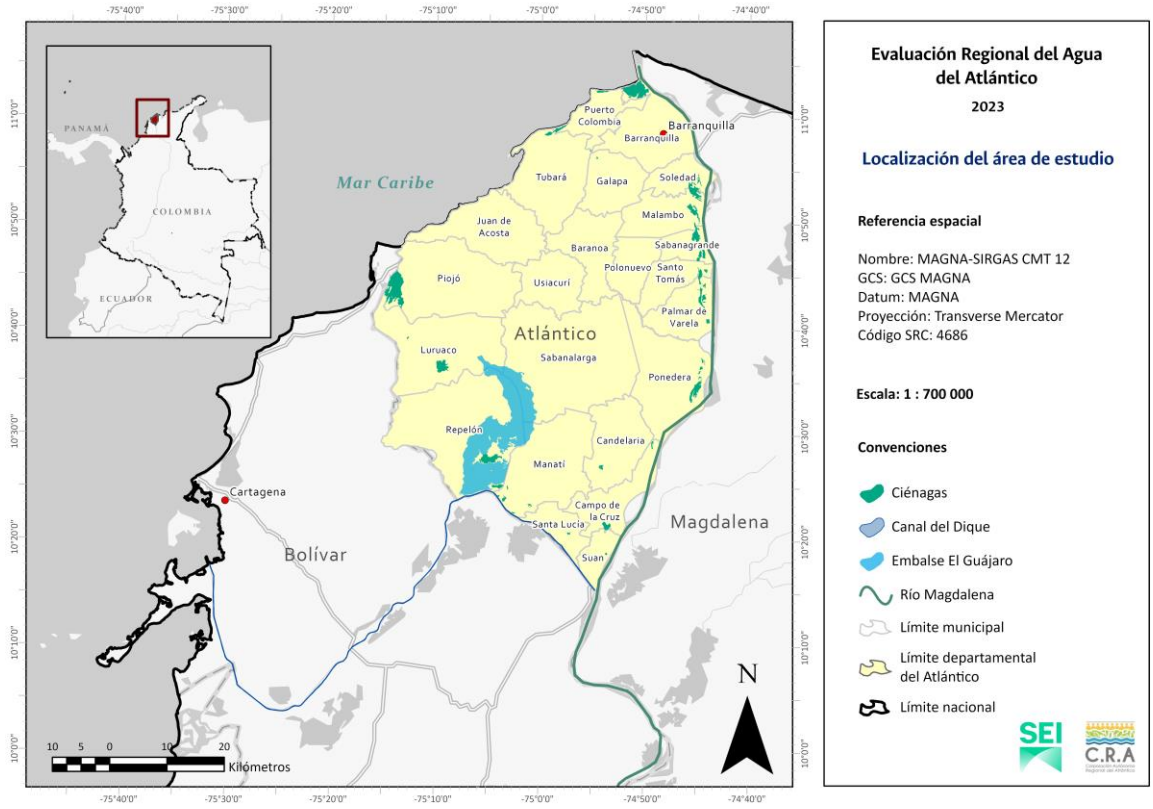


Figura 1. Localización del Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

Administrativamente, el Departamento del Atlántico abarca 23 municipios y cubre totalmente la extensión de 2 subzonas hidrográficas delimitadas en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA)[1] y parcialmente la extensión de 2 subzonas (Figura 2). Las subzonas POMCA o subzonas hidrográficas que se extienden totalmente dentro del Departamento del Atlántico son la subzona Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe y la subzona Ciénaga Mallorquín. Por otro lado, las subzonas Arroyos Directos al Caribe y Canal del Dique margen derecho se encuentran contenidas dentro del Departamento del Atlántico en un 61 y 53%,

[1] Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas o POMCAS: Instrumento de planificación, a través del cual se realiza la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca.: https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/planificacion-de-cuencas-hidrograficas/cuenca-hidrografica/planes-de-ordenacion.

respectivamente. De aquí en adelante, se referirá a estas subzonas hidrográficas como subzona Magdalena, subzona Mallorquín, subzona Caribe y subzona Canal del Dique, respectivamente.

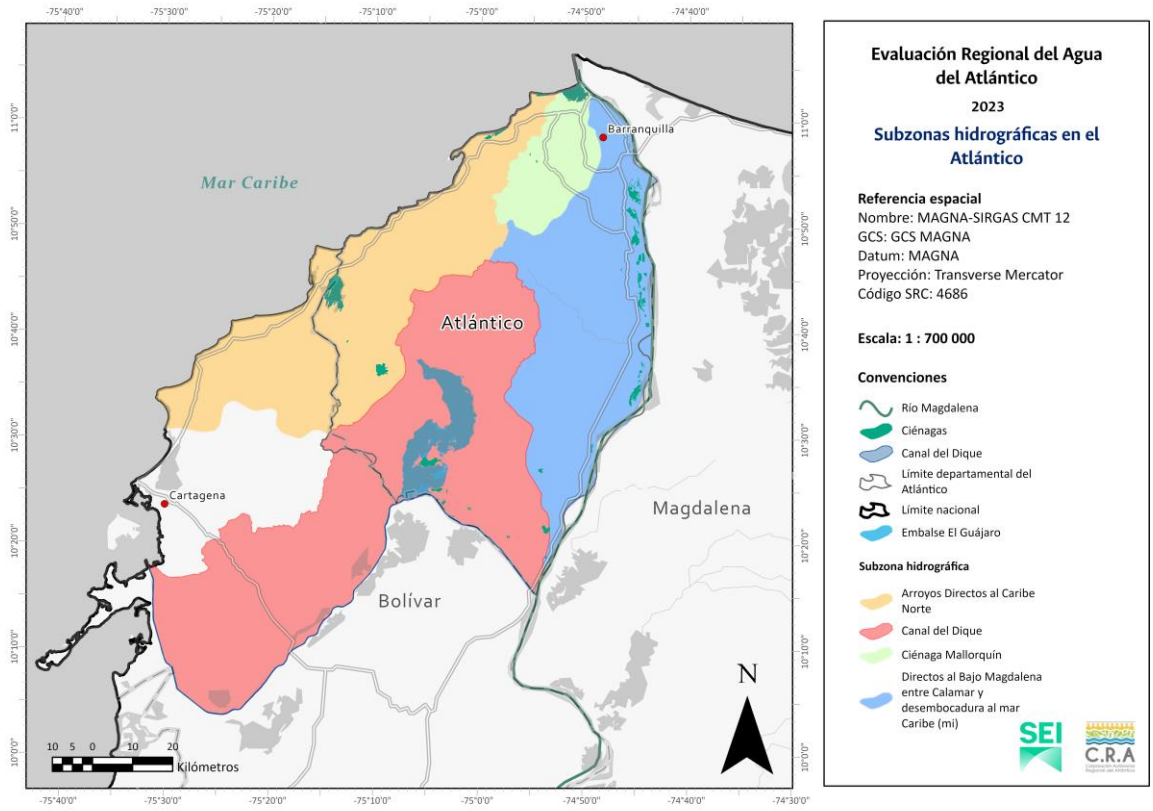


Figura 2. Subzonas POMCA asociadas al Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia a partir de información pública de IDEAM.

En esta sección se presenta una descripción en el sentido más amplio posible que establece las bases para caracterizar el sistema hídrico de una herramienta enfocada en el apoyo a la gestión del recurso hídrico del Departamento del Atlántico. Esta descripción cubre la dimensión física, donde se caracteriza el medio superficial y subterráneo, seguido de una descripción de la infraestructura disponible dentro del Departamento y, finalmente, la caracterización climática.

3.1. Dimensión física

Dentro de la dimensión física se considera la caracterización del Departamento del Atlántico en términos de la topografía, la red de drenaje, cobertura de la tierra, suelos, geología e hidrogeología, subcuencas hidrográficas delimitadas en este estudio para el Departamento del Atlántico y una descripción del río Magdalena en términos de disponibilidad de agua en su desembocadura al mar.

3.1.1. Topografía

La caracterización de la topografía para el Departamento del Atlántico se realizó en base al mapa de elevación digital Mazpen Terrain Tiles de 5 m de resolución de Land Viewer[2]. Notar que este producto no considera información batimétrica, por lo que su información en cuerpos de agua debe considerarse como referencial.

En base a la información del mapa de elevación digital, presentado en la Figura 3, la elevación del terreno en el Departamento del Atlántico toma valores entre 0 y 530 m.s.n.m, con una elevación promedio de 62 m.s.n.m. y una desviación estándar de 65 m. Por otro lado, las pendientes del terreno, presentada en la Figura 4, toma valores entre 0 y 1,600% (0 y 86.4 grados, respectivamente), con un promedio de 7% (4.0 grados) y una desviación estándar de 9.5% (5.5 grados).

Las zonas más planas se encuentran hacia la costa, el río Magdalena y canal del Dique. Además, en las cercanías del río Magdalena y canal del Dique se observan las menores pendientes. Caso contrario, las zonas más altas y con mayores pendientes se encuentran en los contornos del embalse El Guájaro y en el sector poniente del Departamento, en los municipios de Repelón, Luruaco y Piojó y en el sector oriente de los municipios de Juan de Acosta y Tubará.

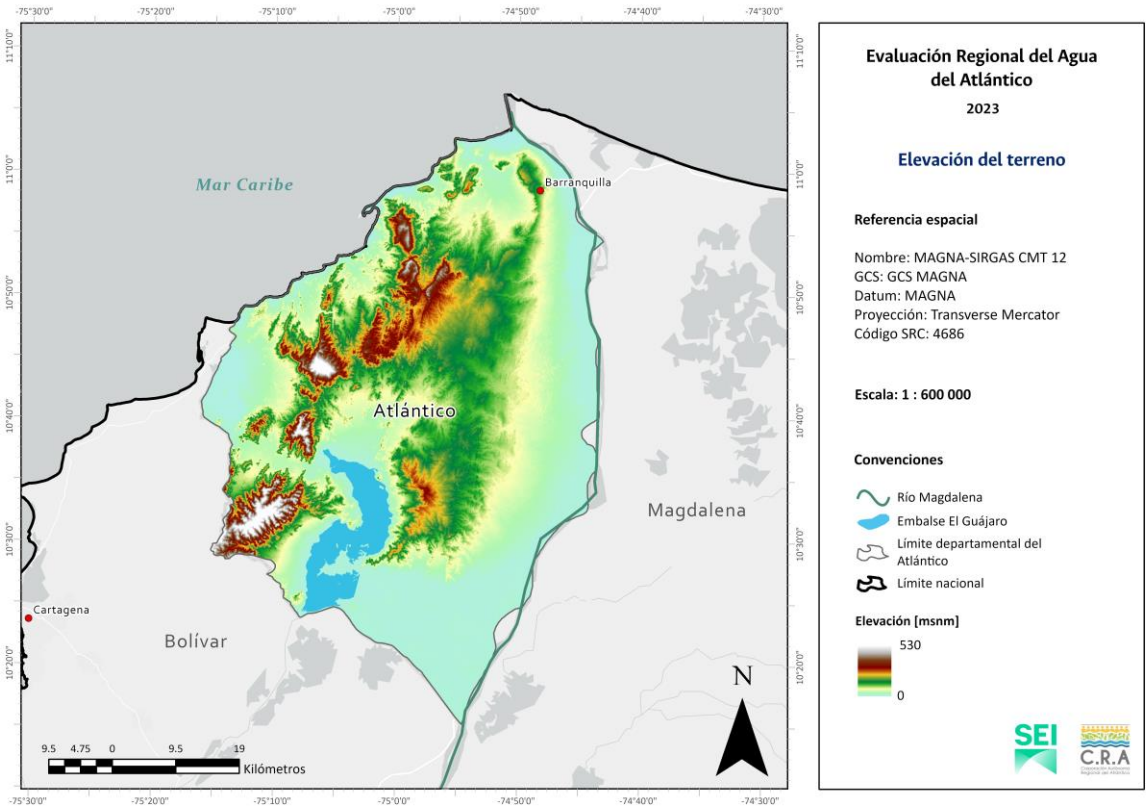


Figura 3. Elevación del terreno en el Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de elevación digital Mazpen Terrain Tiles.

[2] Mapa de elevación digital Mazpen Terrain Tiles en Land Viewer (https://eos.com/landviewer/).

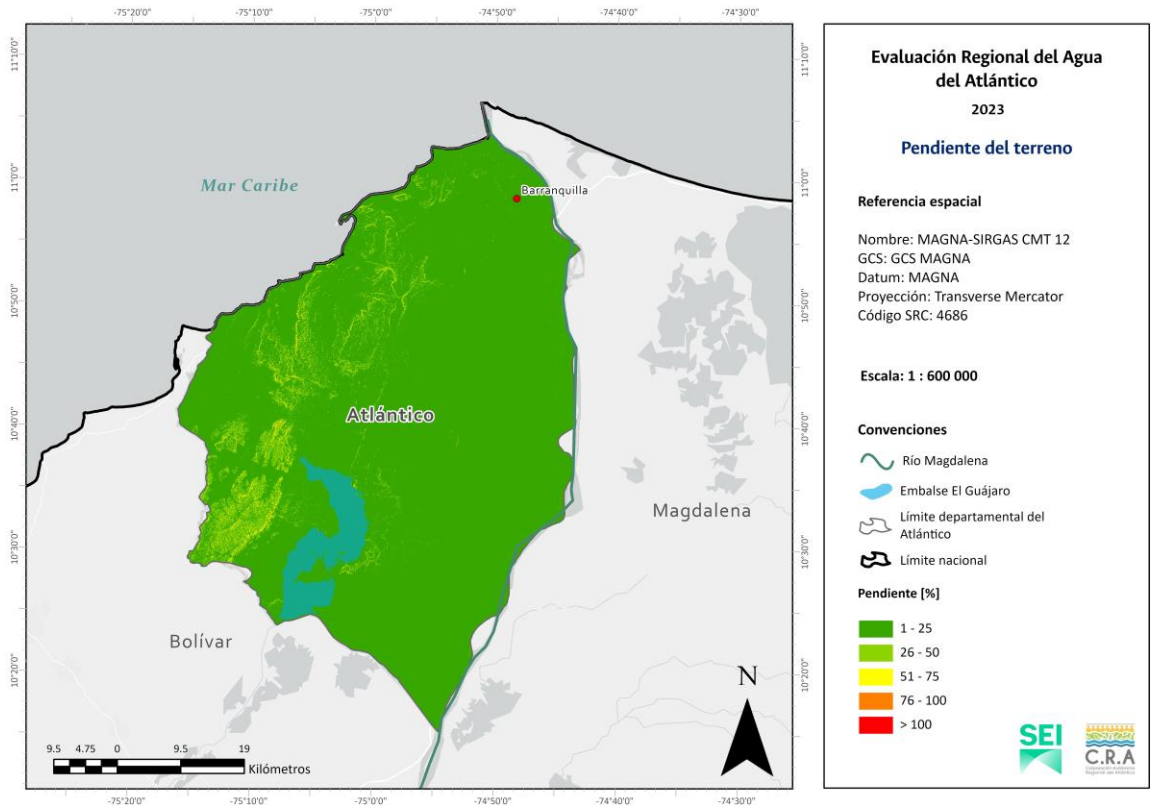


Figura 4. Pendiente del terreno en el Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de elevación digital Mazpen Terrain Tiles.

Para analizar la topografía del Departamento del Atlántico también se analizaron mapas de elevación digital de otras fuentes, como los productos de resolución de 90 y 30 m de la NASA (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM[3]) y de 12.5 m de Alos Palsar[4]. Sin embargo, dada la poca pendiente del terreno y extensión de estas áreas en el Departamento del Atlántico, se requirió de una resolución mayor para poder delimitar adecuadamente las subcuencas hidrográficas a analizar en este estudio, lo cual fue posible únicamente con el producto Mazpen Terrain Tiles (ver sección 3.1.6)

3.1.2. Red de drenaje

A partir del mapa de elevación digital de Mazpen Terrain Tiles, presentado en la sección anterior, se obtuvo la red de drenaje para el Departamento del Atlántico utilizando la herramienta ArcGIS. La red de drenaje resultante se presenta en la Figura 5. Es importante considerar que gran parte de los escurrimientos superficiales en el Departamento del Atlántico son efímeros o intermitentes

Los escurrimientos superficiales en el Departamento del Atlántico siguen tres direcciones principales: 1) hacia el río Magdalena (subzona Magdalena y subzona Mallorquín), 2) hacia el embalse El Guájaro (subzona Canal del Dique), 3) hacia el mar Caribe (subzona Caribe).

[3] NASA SRTM: https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm.
[4] Alos Palsar: https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar/.

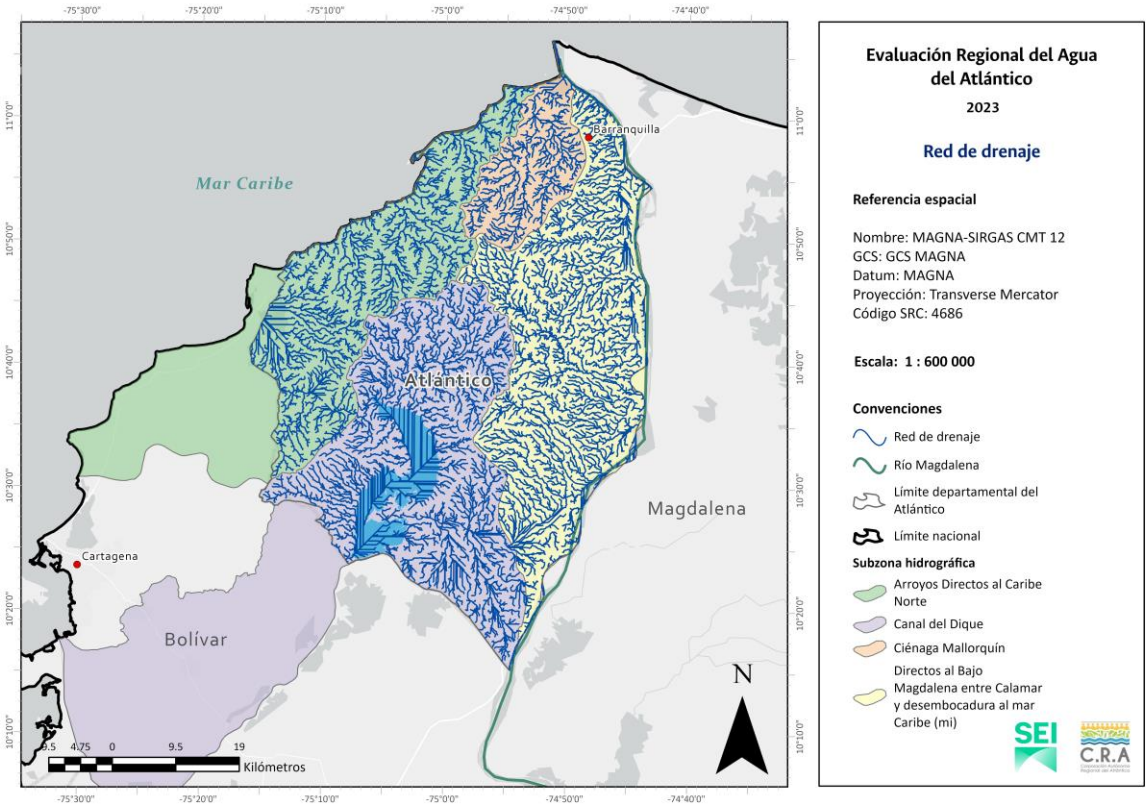


Figura 5. Red de drenaje en el Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de elevación digital Mazpen Terrain Tiles.

3.1.3. Coberturas y usos de la tierra

La caracterización de las coberturas y uso de la tierra para el Departamento del Atlántico se realizó en base a la información vectorial de coberturas y uso de la tierra provista por la CRA, complementando los vacíos con el producto *"Mapa de Cobertura de la Tierra. Adaptación Corine Land Cover. República de Colombia. Escala 1:100.000. Periodo 2018",* desarrollado por IDEAM el año 2021[5]. Es importante notar que ambos productos utilizan convenciones equivalentes.

Las coberturas y usos de la tierra están agrupadas en 6 niveles, donde el nivel 1 es el más general y el nivel 6 el más específico. El primer nivel corresponde a:

1. Territorios artificializados
2. Territorios agrícolas
3. Bosques y áreas seminaturales
4. Áreas húmedas
5. Superficies de agua

[5] Obtenido de Colombia en Mapas: https://www.colombiaenmapas.gov.co/.

Con el objetivo de una caracterización balanceada entre detalle y representatividad y de la construcción de un modelo de recursos hídricos, las coberturas y usos de la tierra se agruparon en 9 categorías en base al nivel 2 de la clasificación disponible. Estas categorías y sus agrupaciones se presentan en la Tabla 2 y Figura 6. Las coberturas y usos de la tierra con mayor presencia en el Departamento del Atlántico corresponden, en orden descendente, a pastos, bosques, sumando un 73,6% del total.

Tabla 2. Categorías de coberturas y usos de la tierra del Departamento del Atlántico.

Categoría cobertura y uso de la tierra	**Agrupación del nivel 2 Corine Land Cover**	**Área [km²]**	**Porcentaje del total**
Agrícola	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	260.8	7.9
Área Abierta	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	64.5	1.9
Bosque	3.1. Bosques 3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	822.2	24.8
Cultivos Permanentes	2.2. Cultivos permanentes	9.5	0.3
Cultivos Transitorios	2.1. Cultivos transitorios	8.1	0.2
Minería	1.3. Zonas de extracción mineras y escombreras	16.4	0.5
Pasto	2.3. Pastos	1621.1	48.8
Superficie de Agua	4.1. Áreas húmedas continentales 4.1. Áreas húmedas continentales 5.1. Aguas continentales 5.2. Aguas marítimas	281.5	8.5
Urbano	1.1. Zonas urbanizadas 1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación 1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	213.1	6.4
No Definido	Áreas sin traslape con productos de coberturas y usos de la tierra	24.1	0.7

Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico y adaptación de Corine Land Cover del 2018 (disponible en https://www.colombiaenmapas.gov.co/).

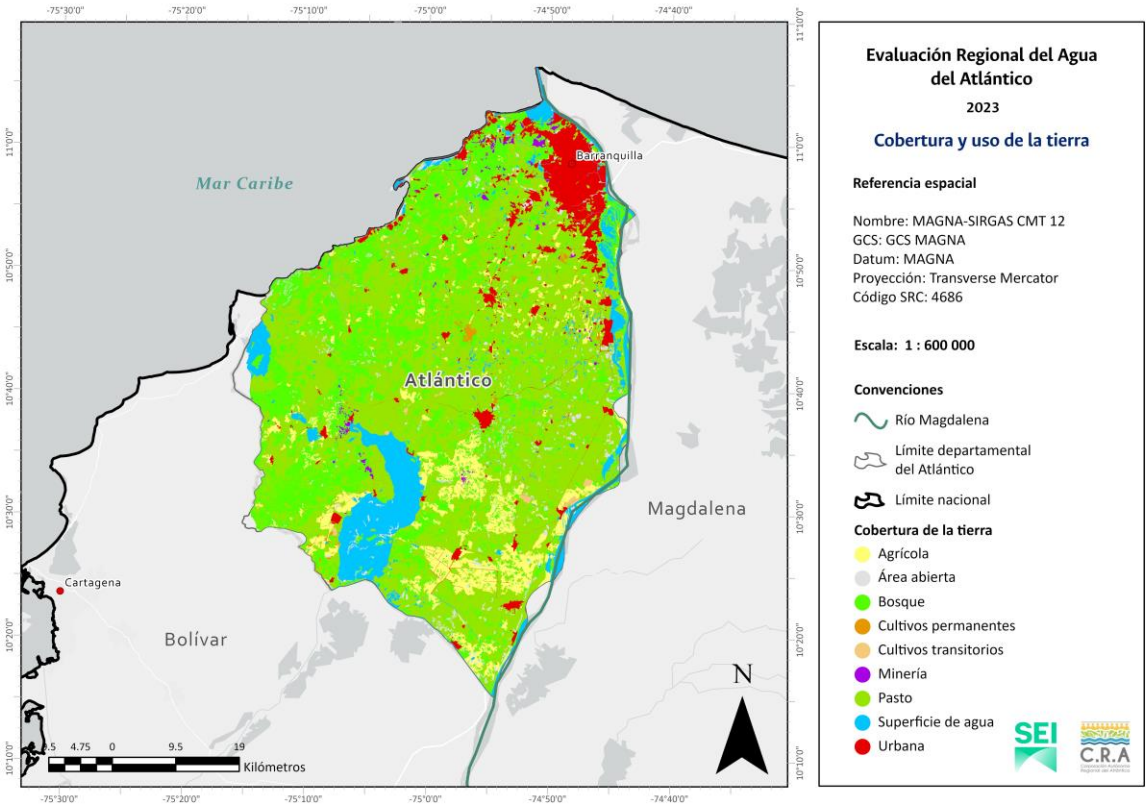


Figura 6. Distribución espacial de las coberturas y usos de la tierra del Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico y adaptación de Corine Land Cover del 2018 (disponible en https://www.colombiaenmapas.gov.co/).

3.1.4. Suelos

La caracterización de suelos se realizó en base al informe de suelos provisto por la CRA. Este estudio es una actualización del *"Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Atlántico"* (IGAC, 2007). Este documento cuenta con información del paisaje y ambiente morfogenético, clima ambiental, tipo de relieve, forma del terreno, litología y/o sedimentos, características de los suelos y unidades geomorfopedológicas, además de información vectorial de estos aspectos.

Con el objetivo de una caracterización balanceada entre detalle y representatividad y de la construcción de un modelo de recursos hídricos, se realizó una caracterización de los suelos en base a la descripción cualitativa de las texturas de estos en: finos, moderado y gruesos. En las zonas donde la cobertura y uso de suelo corresponde a cuerpo de agua y zona urbana, se definió esa clasificación para los suelos. La espacialización de estas categorías se presentan en la Figura 7 y la extensión de cada una de estas se presenta en la Tabla 3.

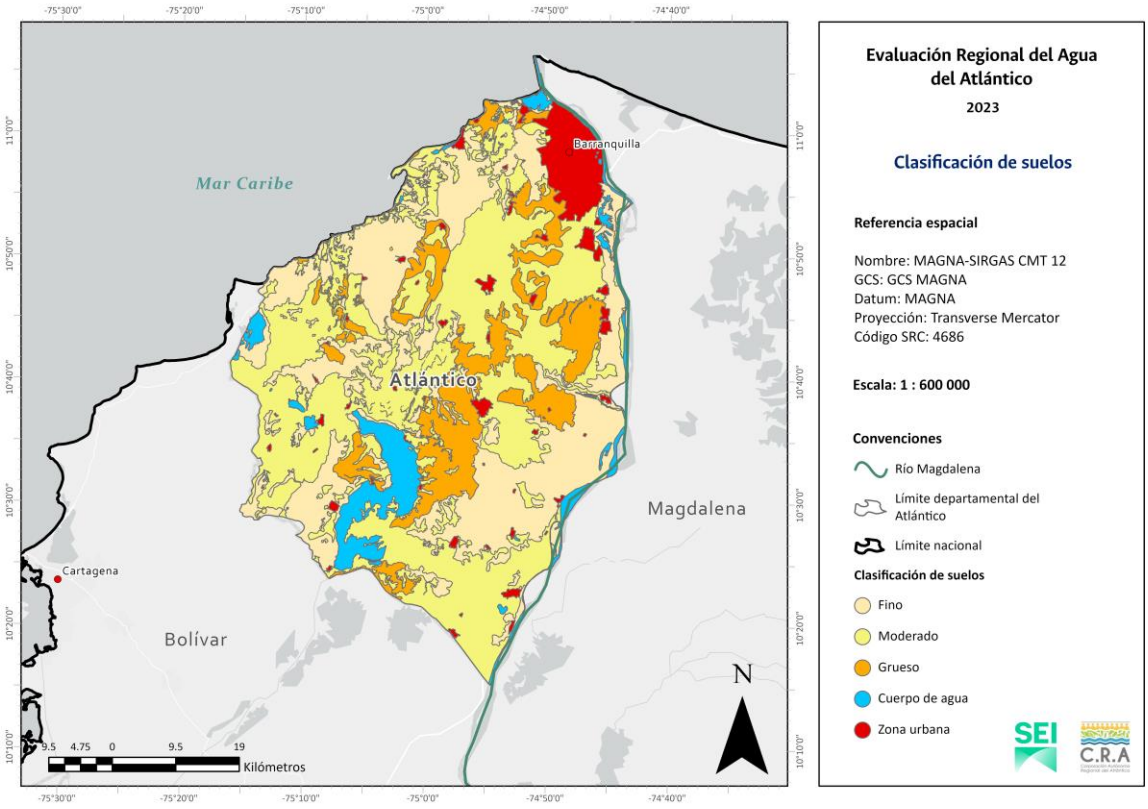


Figura 7. Distribución espacial de las clasificaciones de los suelos del Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

Tabla 3. Presencia de las clasificaciones de suelo del Departamento del Atlántico.

Categoría suelo	Área [km^2]	Porcentaje del total
Fino	1,013.5	30.5
Moderado	1,437.8	43.3
Grueso	499.0	15.0
Zona Urbana	172.6	5.2
Cuerpo de Agua	198.0	6.0
No Definido	0.4	0.0

Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

A partir de la caracterización de suelos presentada en el estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Atlántico, se agruparon las pendientes del terreno en 5 categorías de la siguiente forma:

- Planicie suave: pendientes menores a 3%
- Moderado: pendientes entre 3 y 12%
- Empinado: pendientes entre 12 y 25%
- Fuerte: pendientes mayores a 25%
- No definida: zonas donde no haya una caracterización de la pendiente. Típicamente en zonas con cobertura y usos de la tierra clasificadas como zonas urbanas y cuerpos de agua.

La espacialización de estas categorías se presenta en la Figura 8 y la extensión de cada una de estas se presenta en la Tabla 4.

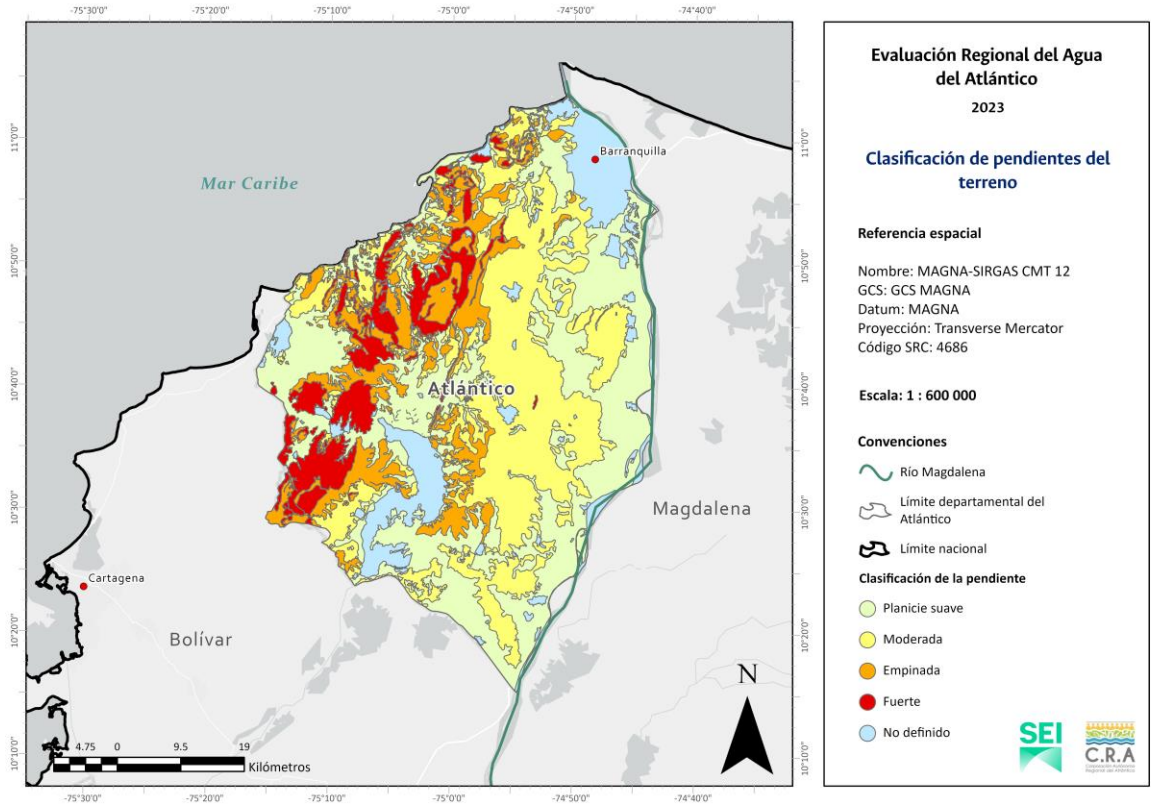


Figura 8. Distribución espacial de las clasificaciones de las pendientes del suelo del Departamento del Atlántico. Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

Tabla 4. Presencia de las clasificaciones de las pendientes del suelo del Departamento del Atlántico.

Categoría pendiente	Área [km²]	Porcentaje del total
Planicie Suave	1,170.1	35.2
Moderado	1,024.5	30.8
Empinado	461.3	13.9
Fuerte	294.4	8.9
No Definido	371.0	11.2

Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

Dentro de la clasificación de suelos, solo un 11.2% está clasificado como zona urbana, cuerpo de agua o no definida, y los suelos finos y moderados predominan cubriendo un 73.8% del total del Departamento. Por otro lado, dentro de la clasificación de pendientes, solo un 11.2% se clasifica como no definida (consistente con el caso de la clasificación de suelos), y las pendientes suaves y moderadas predominan cubriendo un 66.0% del total del Departamento. Si bien hay zonas donde la delimitación de las clasificaciones de suelo y pendiente coinciden, no hay una relación directa entre ambas.

3.1.5. Geología e hidrogeología

Para la caracterización del sistema subterráneo se utilizó la información del estudio *"Diagnóstico preliminar de los acuíferos del Departamento del Atlántico en el marco de la elaboración de los planes de manejo de acuíferos"* (CRA, 2015), compartido por la CRA, incluyendo el informe y la información

vectorial asociada. Dentro del Departamento del Atlántico se han definido 10 unidades hidrogeológicas, agrupadas en 5 categorías de permeabilidad:

- Sedimentos permeables
- Sedimentos poco permeables
- Rocas permeables
- Rocas poco permeables
- Sedimentos y rocas impermeables

Un resumen de la caracterización de cada una de las unidades hidrogeológicas basado en el informe de INGEOMINAS (1985) se presenta en la Tabla 5. La Figura 9 presenta la espacialización de las unidades hidrogeológicas y la Tabla 6 presenta la superficie que abarca cada una de estas unidades en el Departamento del Atlántico.

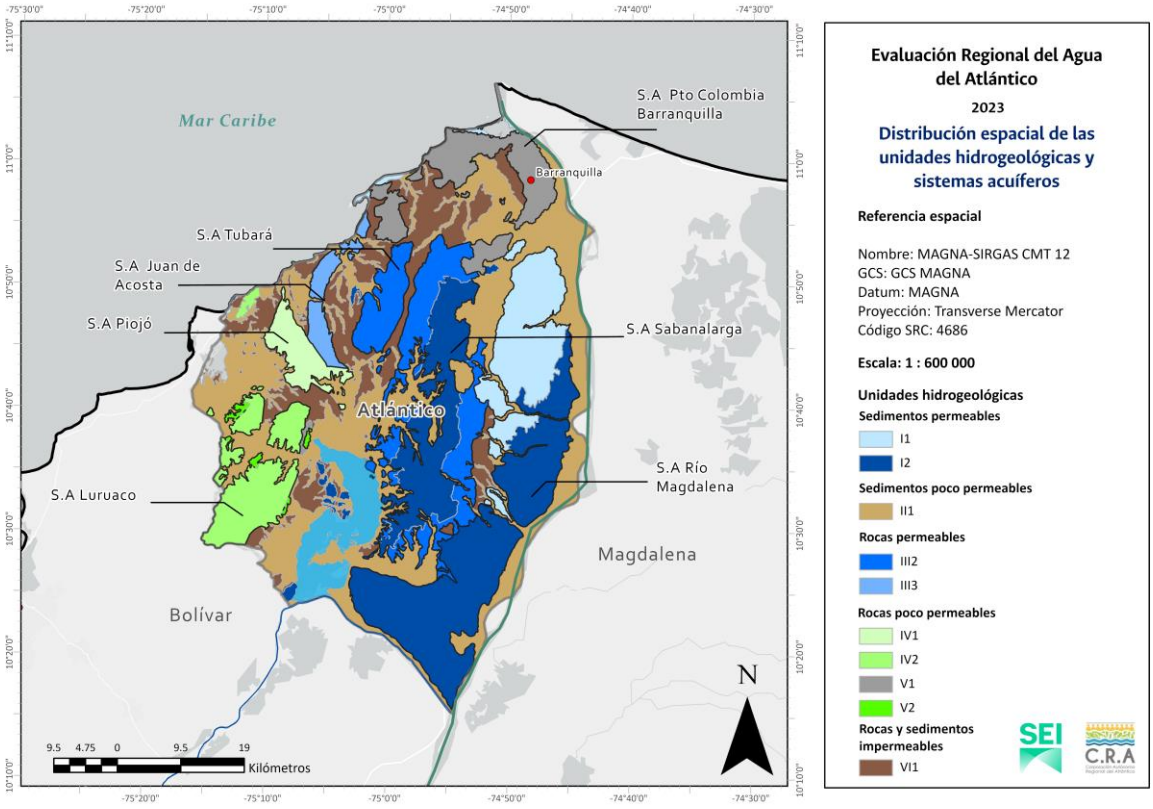


Figura 9. Distribución espacial de las unidades hidrogeológicas y sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico. Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

Tabla 5. Caracterización de las unidades hidrogeológicas del Departamento del Atlántico.

Permeabilidad	Unidad Hidrogeológica	Unidad Geológica	Litología de la unidad Hidrogeológica	Características de la unidad Hidrogeológica
Sedimentos permeables	I1	Depósitos de playa (Q1) Depósitos eólicos recientes (Q2) Depósitos eólicos antiguos (Q5)	Arenas y gravas bien seleccionadas	Acuífero regular, libre de poco espesor y extensión lateral
	I2	Depósitos aluviales – terrazas (Q6) Gravas de Rotinet (Q7) Areniscas Friables (T3)	Gravas, arenas, areniscas y conglomerados friables	Acuífero bueno, libre y semiconfinado con variación del espesor
Sedimentos poco permeables	II1	Depósitos aluviales (Q3)	Limos, arenas y gravas	Acuitardos y acuíferos locales pobres, libres y de poco espesor. Fuente de recarga: Precipitación y agua superficial
Rocas permeables	III2	Arcillolitas calcáreas (T4) Arenisca calcárea de Santa Rosa (T5) Conglomerado de Isabel López (T6)	Arcillolita y areniscas fina, areniscas, calcáreas fosilíferas con intercalaciones arcillosas, conglomerados y arenisca friable	Los niveles de arenisca y conglomerado constituyen un acuífero regular a bueno confinado o libre según la disposición estructural. Fuente de recarga: precipitación, agua subterránea y superficial
	III3	Arenisca de Pajuancho (T8) Areniscas del Cerro Las Viudas (T9)	Arenisca friable de grano medio a grueso con intercalaciones de arcillolita	Acuífero pobre a regular, confinado. Fuente de recarga: Precipitación, agua superficial
Rocas poco permeables	IV1	Arenisca de San Vicente (T11)	Arenisca arcillosa fosilífera, arcillolita y lodolita	Acuitardo por la baja permeabilidad de las capas de arenisca. Fuente de recarga: Precipitación
	IV2	Turbiditas de Luruaco (T16)	Arcillolita y arenisca arcillosa a veces calcáreas	En su mayor parte se considera un acuitardo. Localmente los niveles de arenisca constituyen un acuífero pobre, confinado
	V1	Calizas arrecifales del Popa (T1) Calizas de Arroyo de Piedra (T15)	Calizas y margas coralinas	Acuíferos muy locales, según densidad del fracturamiento
	V2	Conglomerado de Pandales (T14)	Conglomerado con matriz arenosa	Acuíferos locales, pobre a bueno según la densidad del fracturamiento, libre, confinado debajo de las capas del cuaternario
Sedimentos y rocas impermeables	VI1	Volcanes de lodo (Q4) Arcillolitas de Sibarco (T7) Arcillolitas de Furú (T10) Limalitas ferruginosas (T12) Arcillolitas Cocatocino (T13)	Lodo, arcillolita y limolita, ferrufinosa con esporádicas ntercalaciones de arensica arcillosa. Yeso diseminado	Acuicludo

Fuente: Modificado de INGEOMINAS (1985).

Tabla 6. Presencia de las unidades hidrogeológicas del Departamento del Atlántico.

Unidad Hidrogeológica	Área [km^2]	Porcentaje del total
I1	250.8	7.5
I2	722.2	21.7
II1	1,003.5	30.2
III2	306.1	9.2
III3	55.0	1.7
IV1	71.2	2.1
IV2	175.1	5.3
V1	183.4	5.5
V2	11.1	0.3
VI1	386.1	11.6
No clasificada	157.2	4.7

Fuente: Elaboración propia a partir de CRA (2015).

En el estudio de acuíferos para el Departamento del Atlántico (CRA, 2015) se presentan 4 sistemas acuíferos primarios y 3 sistemas acuíferos secundarios. Los sistemas acuíferos primaros corresponden al sistema acuífero río Magdalena, sistema acuífero Barranquilla – Puerto Colombia, sistema acuífero Sabanalarga y sistema acuífero Tubará. Los sistemas acuíferos secundarios corresponden al sistema acuífero Juan de Acosta, sistema acuífero Piojó y sistema acuífero Luruaco. La Figura 9 presenta la espacialización de los sistemas acuíferos y en la Tabla 7 se detalla el tipo de unidad hidrogeológica que compone cada sistema acuífero. Adicionalmente, la Figura 10 presenta la espacialización de zonas acuíferas y no acuíferas en función de delimitación de los sistemas acuíferos.

Tabla 7. Unidades hidrogeológicas que componen cada sistema acuífero.

Sistema acuífero	Área sistema acuífero [km^2]	Unidad hidrogeológica	Área unidad hidrogeológica [km^2]
Río Magdalena	708.6	I1	237.5
		I2	471.1
Barranquilla – Puerto Colombia	179.6	V1	179.6
Sabanalarga	459.7	I2	229.6
		II1	0.5
		III2	229.6
Tubará	78.3	III2	78.3
Juan de Acosta	55.0	III3	55.0
Piojó	71.2	IV1	71.2
Luruaco	179.0	IV2	167.8
		V2	11.1
No clasificado como sistema acuífero	1592.2	I1	13.3
		I2	21.6
		II1	1003.0
		IV2	7.3
		V1	3.8
		VI1	386.1
		No clasificada	157.2

Fuente: Elaboración propia a partir de CRA (2015).

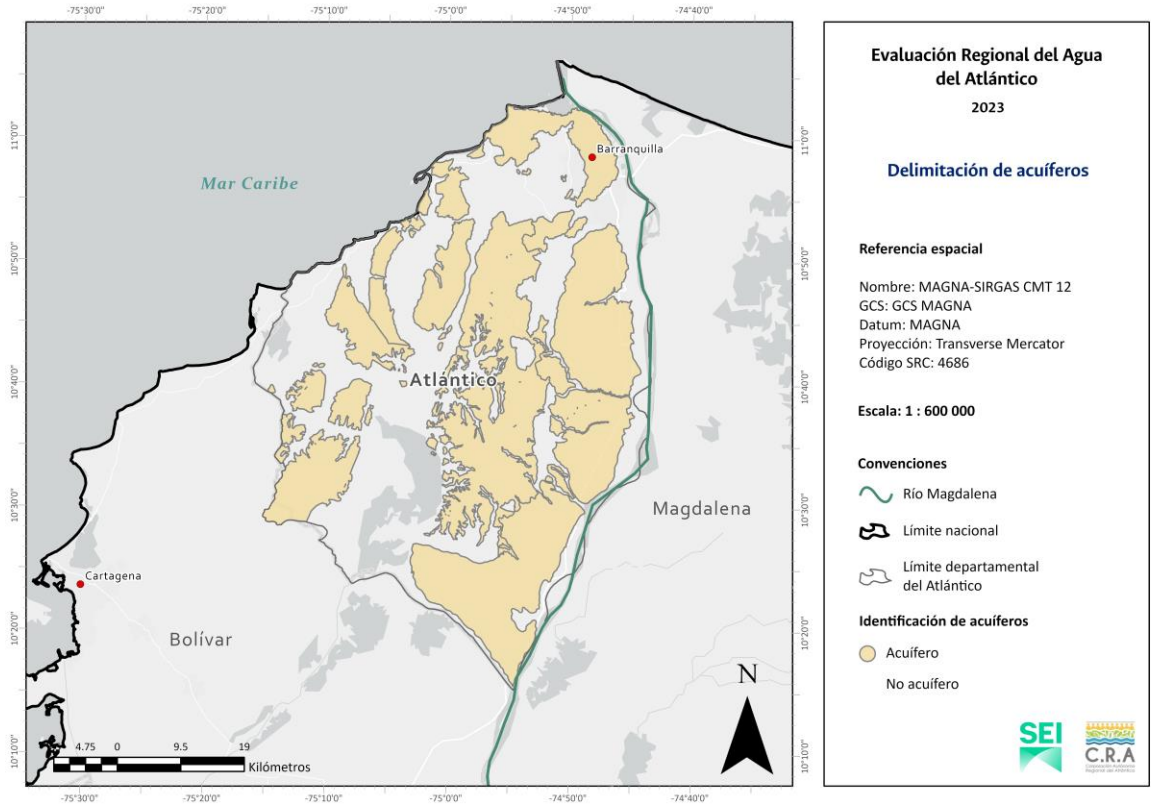


Figura 10. Categorización de zona acuífera y no acuífera en función de la ubicación de los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia a partir de CRA (2015).

A excepción del sistema acuífero Barranquilla – Puerto Colombia, los acuíferos primarios están compuestos principalmente por sedimentos o rocas permeables. Por otro lado, a excepción del sistema acuífero Juan de Acosta, todos los acuíferos secundarios están compuestos principalmente por rocas poco permeables. Respecto al área no clasificada como sistema acuífero, esta se compone principalmente de la unidad hidrogeológica II1 (sedimentos poco permeables) y VI1 (sedimentos y rocas impermeables), cubriendo un 63 y 24% del total de esta área (considerando solo las unidades hidrogeológicas clasificadas), respectivamente.

En base a esta clasificación, los sistemas acuíferos primarios corresponden a acuíferos libres a semiconfinados y, a excepción del sistema acuífero Barranquilla – Puerto Colombia, estarían compuestos principalmente por un medio permeable, ya sea poroso o fracturado. El sistema acuífero Barranquilla – Puerto Colombia, está compuesto principalmente por un medio fracturado poco permeable. Por otro lado, los sistemas acuíferos secundarios corresponden principalmente a acuíferos confinados y, a excepción del sistema acuífero Juan de Acosta, estarían compuestos por un medio fracturado poco permeable. El sistema acuífero Juan de Acosta está compuesto principalmente por un medio fracturado permeable. Finalmente, la zona no clasificada como sistema acuífero está compuesta principalmente por un medio impermeable y un medio poroso poco permeable, en algunos casos actuando como un acuitardo.

Adicional a la información de unidades hidrogeológicas y sistemas acuíferos, durante el desarrollo del estudio de acuíferos para el Departamento del Atlántico (CRA, 2015) se levantó información de profundidad al agua subterránea en 142 puntos de captación de aguas subterráneas, información que se presenta en la Figura 11. Esta información se utilizó para calcular el nivel estático respecto al nivel

del mar en base al mapa de elevación digital. Los resultados del nivel freático desde el nivel del mar se muestran en la Figura 12.

A partir de los niveles medidos en el Departamento del Atlántico, el gradiente hidráulico sugiere que el flujo subterráneo va principalmente desde el sistema acuífero de Tubará y el sector norte del sistema acuífero de Sabanalarga hacia el embalse El Guájaro, el mar caribe y el río Magdalena. Esta caracterización cualitativa podría verse afectada por la heterogeneidad del sistema subterráneo, los sistemas de fallas, además de las potenciales interacciones superficial-subterránea entre el sistema subterráneo y las ciénagas, embalse El Guájaro o río Magdalena.

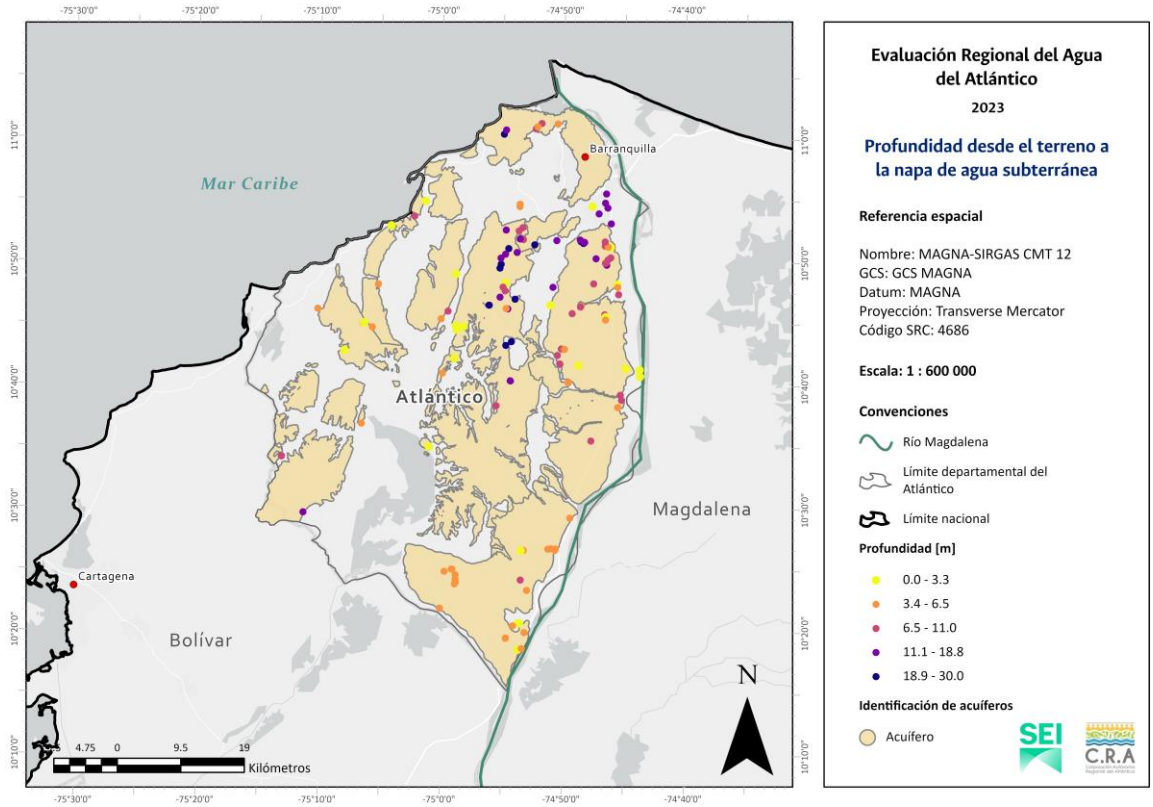


Figura 11. Profundidad desde el terreno a la napa de agua subterránea medida durante el estudio de acuíferos. Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

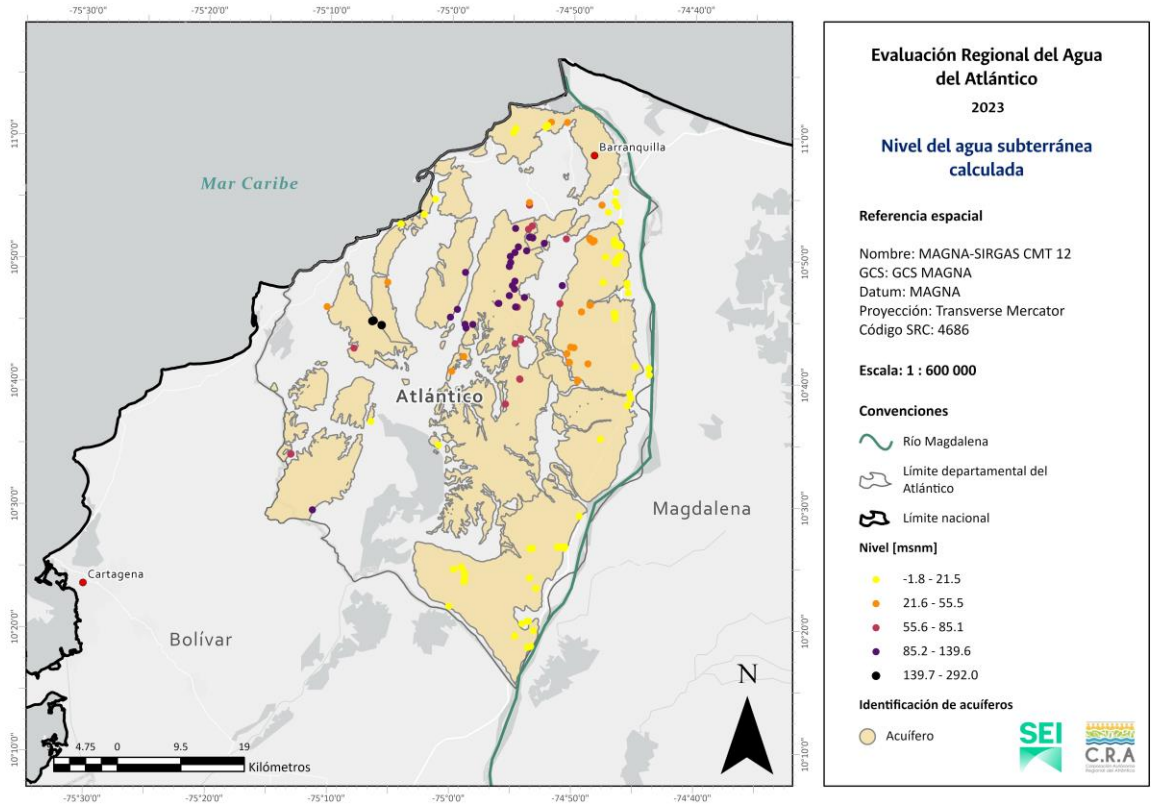


Figura 12. Nivel del agua subterránea calculada a partir de la profundidad medida y el nivel del terreno del mapa de elevación digital.
Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

3.1.6. Subcuencas hidrográficas

En el estudio *"Estructuración y espacialización de los Índices de Uso del Agua – IUA en la jurisdicción de Corporación Autónoma Regional del Atlántico"* (CRA, 2013) se presentan las subcuencas delimitadas y codificadas por Uninorte (2013) en un estudio previo realizado para la CRA. Sin embargo, no se tuvo acceso a dicho informe (se desconoce también el nombre, por lo que no se pudo referenciar) ni a la información base con la cual se generó esta delimitación. Es por esto por lo que en este estudio se realizó una nueva delimitación de subcuencas hidrográficas con la herramienta ArcGIS en base al mapa de elevación digital Mazpen Terrain Tiles, presentado en la sección 3.1.1.

Para la delimitación de subcuencas se seleccionó el mapa de elevación digital Mazpen Terrain Tiles debido a su alta resolución, compatible con las bajas pendientes del terreno en el Departamento del Atlántico, lo que permitió en una delimitación de subcuencas consistente con la presentada en el estudio del Índice de Uso del Agua. Por otro lado, los productos grillados o mapas de elevación digital de otras fuentes como los productos de resolución de 90 y 30 m de la NASA (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) y de 12.5 m de Alos Palsar presentaron dificultades para aproximar estas delimitaciones, e incluso, en algunos casos no lograron delimitar las subzonas hidrográficas.

Las subcuencas resultantes de la delimitación con el producto Mazpen Terrain Tiles se codificaron de forma tal de coincidir con la codificación general de las subcuencas presentadas en el estudio de Índice de Uso del Agua (CRA, 2013). Las subcuencas delimitadas cubren áreas desde 4 a 500 km^2, con un promedio de 138 km^2. Estas delimitaciones se presentan en la Figura 13 y las respectivas

codificaciones y equivalencias se presentan en la Tabla 8. Adicionalmente, la Tabla 9 presenta la comparación de las áreas de estas delimitaciones.

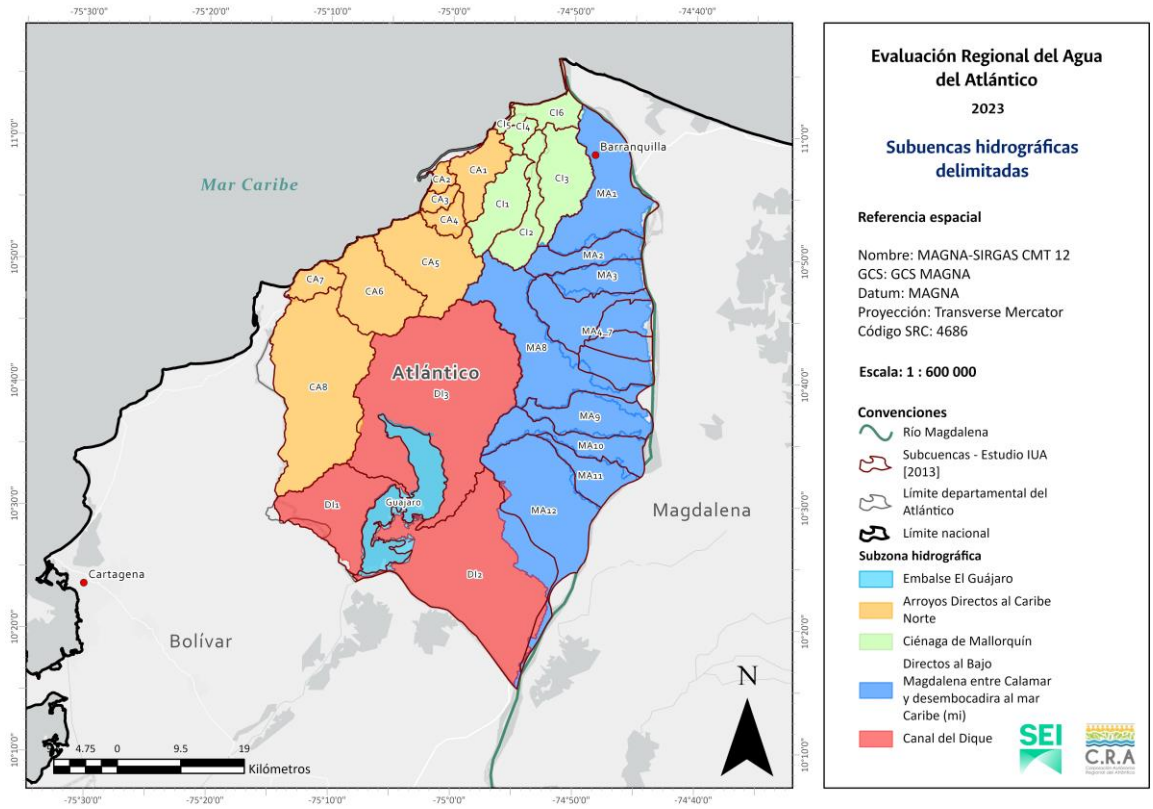


Figura 13. Subcuencas hidrográficas delimitadas para el Departamento del Atlántico en el estudio del Índice de Uso de Agua (CRA, 2013) y en este estudio.
Fuente: Elaboración propia y CRA (2013).

Tabla 8. Equivalencia de las subcuencas delimitadas en este estudio (ERA) y en el estudio del Índice de Uso del Agua (IUA).

Subzona hidrográfica	Código ERA	Código IUA	Nombre subcuenca IUA
Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar	MA1	1 MA	Urbano y Ciénaga La Bahía
	MA2	2 MA	Ciénaga de Malambo
	MA3	3 MA	Ciénaga Convento
	MA4_7	4 MA	Ciénaga Sabanagrande
		5 MA	Ciénaga Sabanagrande y Santo Tomas
		6 MA	Ciénaga Luisa
		7 MA	Ciénaga Manatí y Paraíso
	MA8	8 MA	Arroyo Grande
	MA9	9 MA	Ciénaga Ponedera
	MA10	10 MA	Ciénaga Uvero
	MA11	11 MA	Ciénaga Uvero 2
	MA12	12 MA	Ciénaga La Poza
Caribe y Ciénaga Mallorquín	CI1	1 CI	San Luis
	CI2	2 CI	Oriental C. Pan de Azúcar
	CI3	3 CI	Arroyo Hondo
	CI4	4 CI	Cisne
	CI5	5 CI	P Cantera
	CI6	6 CI	Plano Costero

Subzona hidrográfica	Código ERA	Código IUA	Nombre subcuenca IUA
Arroyos Directos al Caribe	CA1	1 CA	Ciénaga Balboa y Arroyo Grande
	CA2	2 CA	Arroyo Trébol
	CA3	3 CA	Arroyo Caimán
	CA4	4 CA	Arroyo caja
	CA5	5 CA	Arroyo Juan de Acosta
	CA6	6 CA	Arroyo Cascabel
	CA7	7 CA	Galerazanba
	CA8	8 CA	Ciénaga del Totumo
Canal del Dique margen derecho	DI1	1 DI	Occidental Embalse del Guájaro
	DI2	2 DI	Oriental Embalse del Guájaro
	DI3	3 DI	Norte Canal del Dique

Fuente: Elaboración propia y CRA (2013).

Tabla 9. Comparación de áreas de las subcuencas delimitadas en este estudio (ERA) y en el estudio del Índice de Uso del Agua (IUA).

Código subcuenca ERA	Área ERA [km^2]	Área IUA [km^2]	Diferencia ERA – IUA [km^2]
MA1	152.2	161.4	-9.2
MA2	63.0	59.2	3.8
MA3	52.4	60.0	-7.6
MA4_7	205.5	198.0	7.5
MA8	187.9	189.1	-1.2
MA9	75.7	88.4	-12.7
MA10	84.6	82.6	2.0
MA11	55.6	53.9	1.7
MA12	249.9	210.6	39.3
CI1	77.2	75.4	1.8
CI2	62.0	64.5	-2.5
CI3	100.2	99.4	0.8
CI4	19.8	16.8	3.0
CI5	3.9	4.4	-0.5
CI6	36.2	39.0	-2.8
CA1	63.2	62.7	0.5
CA2	10.6	12.3	-1.7
CA3	14.2	14.0	0.2
CA4	24.6	24.4	0.2
CA5	145.8	146.4	-0.6
CA6	122.4	122.9	-0.5
CA7	31.1	31.1	0.0
CA8	320.9	322.9	-2.0
DI1	136.5	140.9	-4.4
DI2	355.8	409.9	-54.1
DI3	499.3	503.0	-3.7

Fuente: Elaboración propia y CRA (2013).

La Figura 13, la Tabla 8 y la Tabla 9 muestran que la delimitación de subcuencas generadas a partir del mapa de elevación digital Mazpen Terrain Tiles es consistente con la delimitación realizada en el estudio del Índice de Uso del Agua (CRA, 2013), con algunas diferencias principalmente en el borde oriental del Departamento del Atlántico, en las subcuencas de la subzona Magdalena. Adicionalmente, se agruparon 4 subcuencas debido a que estas corresponden a un sistema de

ciénagas interconectadas en el borde oriental del Departamento (cuencas 4 RM, 5 RM, 6 RM y 7 RM, agrupadas en la subcuenca RM4_7). Otro caso donde se ve mayor diferencia en la extensión de las subcuencas es en la frontera de las subcuencas MA12 y DI2 (12 MA y 2 DI para el estudio del Índice del Uso del Agua, respectivamente).

A partir de la nueva delimitación de subcuencas hidrográficas para el Departamento del Atlántico y en base al mapa de elevación digital Mazpen Terrain Tiles, se calcularon parámetros morfométricos relevantes para el cálculo de indicadores de la Evaluación Regional del Agua. Estos parámetros se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros morfométricos de las subcuencas delimitadas en este estudio.

Subcuenca ERA	Área [km^2][1]	Pendiente media [%][1]	Densidad de drenaje [km/km^2][1]	Coeficiente de compacidad [-][1,2]
MA1	152.2	4.1	1.9	2.0
MA2	63.0	4.0	1.9	2.5
MA3	52.4	3.2	2.0	2.1
MA4_7	205.5	3.5	1.8	2.0
MA8	187.9	5.0	1.9	3.2
MA9	75.7	3.4	1.8	2.6
MA10	84.6	3.8	1.9	3.2
MA11	55.6	2.6	1.8	2.5
MA12	249.9	4.0	1.8	2.4
CI1	77.2	9.7	1.7	1.7
CI2	239.4	7.6	1.8	1.7
CI3	100.2	5.5	1.8	2.0
CI4	19.8	9.3	1.8	1.6
CI5	3.9	11.2	1.1	2.1
CI6	295.6	7.3	1.8	1.9
CA1	63.2	12.9	1.6	1.9
CA2	10.6	15.1	1.7	1.6
CA3	14.2	10.3	1.7	1.6
CA4	24.6	14.2	1.7	1.7
CA5	145.8	12.4	1.6	1.6
CA6	122.4	14.3	1.7	1.5
CA7	31.1	8.6	1.5	1.5
CA8	320.9	12.7	1.8	1.6
DI1	136.5	14.0	1.8	1.7
DI2	355.8	3.1	1.9	2.6
DI3	499.3	9.0	1.7	2.2

[1]: Considera el área aportante total.

[2]: Se considera el coeficiente de Gravelius, el cual es un parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la subcuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la subcuenca.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los parámetros morfométricos de las subcuencas delimitadas en este estudio, la pendiente media toma valores entre 2.6 a 15.1%, con un promedio de 8.1%; la densidad de drenaje toma valores entre 1.1 a 2.0 km/km^2, con un promedio de 1.7 km/km^2; y el coeficiente de compacidad de Gravelius toma valores entre 1.5 a 3.2, con un promedio de 2.0. Estos resultados muestran que las subcuencas tienden a ser planicies suaves a moderadas y de geometría irregular.

3.1.7. Río Magdalena

El río Magdalena fluye de sur a norte, con su cabecera en el Departamento del Huila y desembocadura al mar en el borde oriental del Departamento del Atlántico, con un área de drenaje de aproximadamente 250,000 km^2. A lo largo de sus 1,540 km de longitud recibe aportes de diversos afluentes, siendo el río Cauca su afluente principal. En base a la información de caudales superficiales disponible en la estación Calamar, ubicada aguas arriba del Departamento del Atlántico, en el período 1993 – 2022 el río Magdalena desemboca en el mar con un caudal promedio anual de 7,400 m^3/s, coeficiente de variación de 0.2 y valores promedio mensuales entre 4,300 y 10,000 m^3/s, con una estacionalidad bimodal que alcanza el valor máximo en su segundo modo cercano a diciembre y el mínimo en marzo (ver Figura 14 y Figura 15).

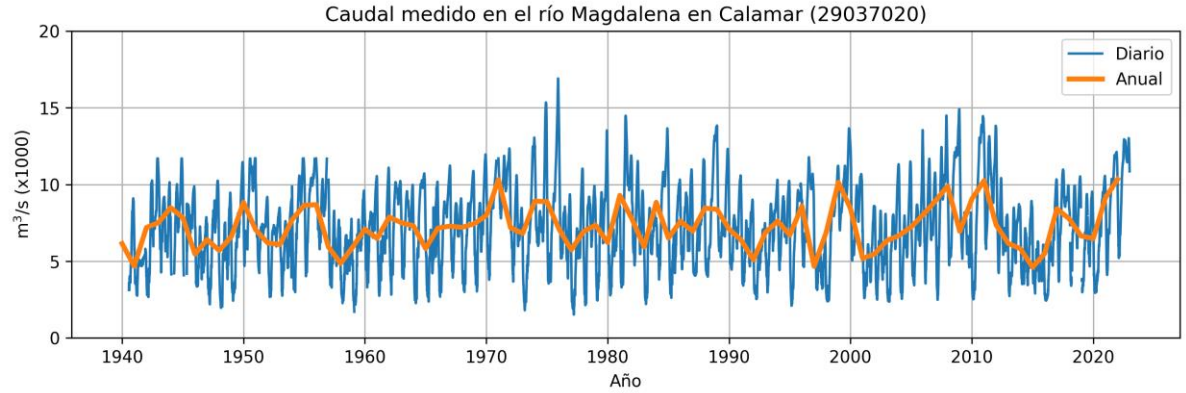


Figura 14. Información de caudales en el río Magdalena en Calamar (ID IDEAM 29037020).
Fuente: Elaboración propia a partir de información de IDEAM.

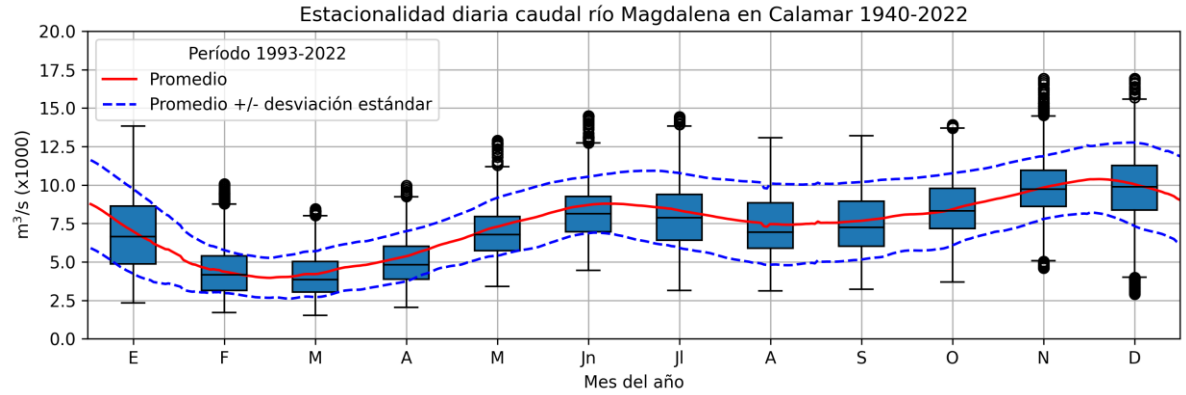


Figura 15. Estacionalidad diaria de caudales en el río Magdalena en Calamar (ID IDEAM 29037020) en el período 1940 – 2022.
Nota: La línea continua roja muestra el promedio diario en el período 1993 – 2022, asociado a los últimos 30 años, y las líneas discontinuas muestran la envolvente considerando el promedio diario y una desviación estándar.
Fuente: Elaboración propia a partir de información de IDEAM.

El río Magdalena es una de las principales fuentes de agua superficial para el Departamento del Atlántico, frecuentemente considerado como una fuente inagotable por sus altos caudales comparados a las concesiones existentes y potenciales necesidades de suministro de agua para el Departamento del Atlántico (ver sección 5).

Es importante notar que, si bien el régimen natural del caudal del río Magdalena es bimodal, fenómenos climáticos globales como El Niño o La Niña pueden causar un cambio a régimen monomodal que, según la magnitud, podrían dar a lugar a períodos secos o húmedos, respectivamente, respecto al régimen normal. El año 2010 es un ejemplo de un fenómeno climático La Niña, en que las crecidas en precipitaciones en la subcuenca que alimenta al río Magdalena generaron en un aumento en el caudal de este, resultando en un desbordamiento que inundó gran parte del sector sur del Departamento del Atlántico a una razón de 1,600 m^3/s (CRA, 2012).

3.2. Infraestructura hídrica

En esta sección se describe el embalse El Guájaro y la red de monitoreo de variables hidro-climáticas en el Departamento del Atlántico. El análisis del sistema de acueducto, canal del Dique y embalse El Guájaro escapan a los objetivos de la ERA. Sin embargo, dado que el embalse El Guájaro es un hidrosistema que responde a la hidrología y gestión local, se consideró realizar un análisis y caracterización de este para apoyar la toma de decisiones futuras.

3.2.1. Embalse El Guájaro

El embalse El Guájaro se encuentra en el suroeste del Departamento del Atlántico, dentro de los municipios de Manatí, Luruaco, Repelón y Sabanalarga. Adicionalmente, el embalse se encuentra dentro de la subzona Canal del Dique margen derecho y recibe directamente la escorrentía generada en las subcuencas DI1, DI2 y DI3 (Figura 16). La información presentada en esta sección se basa en el informe *"Actualización del manual de operaciones del hidrosistema al cual pertenece el embalse El Guájaro y llevar a cabo el diseño de las estructuras y sistemas para disminuir la vulnerabilidad de la zona ante eventos climatológicos extremos"* (CRA, 2012).

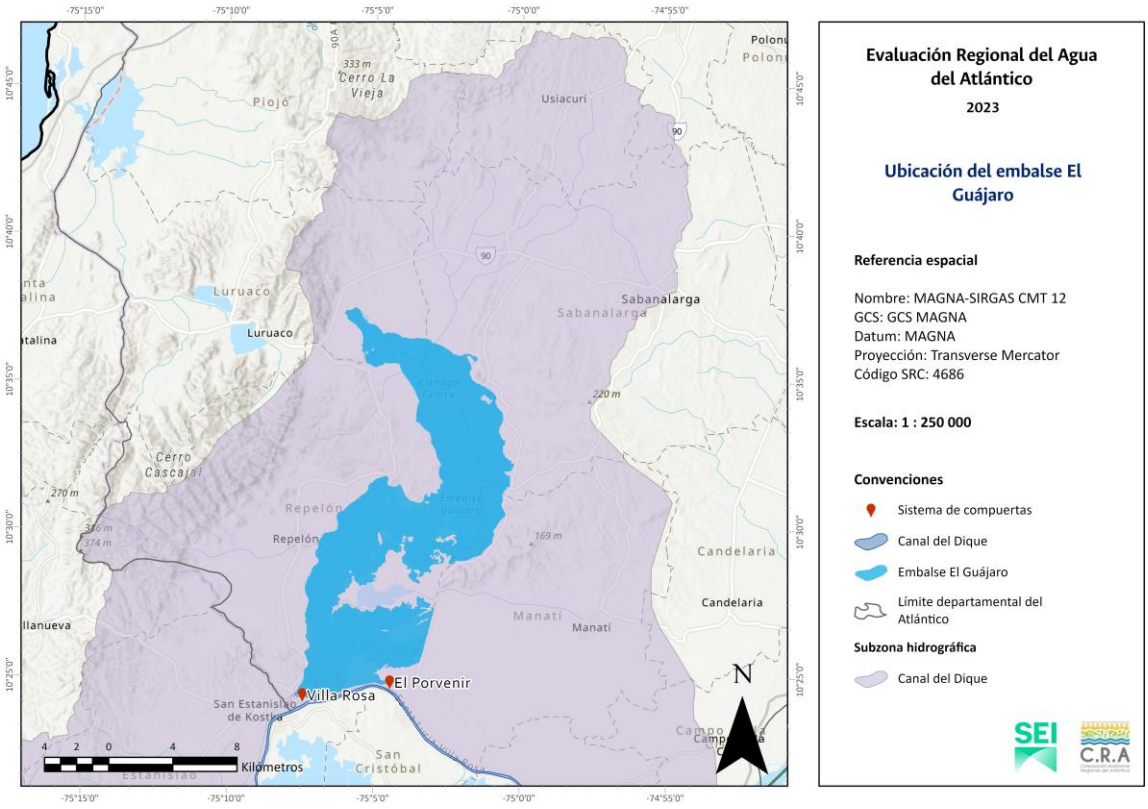


Figura 16. Ubicación del embalse El Guájaro.
Fuente: Elaboración propia.

El embalse El Guájaro se formó por la modificación de alrededor de 90 km^2 del plano inundable del río Magdalena, resultando en un espejo de agua del embalse de 160 km^2. En el estudio del embalse (CRA, 2012) se realizó un levantamiento topobatimétrico de este, a partir del cual se construyeron curvas de volumen-elevación y se determinó que la capacidad de almacenamiento del embalse es de 400,000,000 m^3 al momento de tener una profundidad de 4.25 m o un nivel de 4.80 m.s.n.m. Sin embargo, la existencia de diques perimetrales permite que el embalse pueda almacenar mayores volúmenes de agua. La Figura 17 presenta las curvas volumen-elevación, escaneadas manualmente del informe del embalse (CRA, 2012), y el factor de transformación de elevación respecto al nivel del mar a nivel respecto al fondo del embalse, el cual corresponde a un valor promedio de 0.55 m.

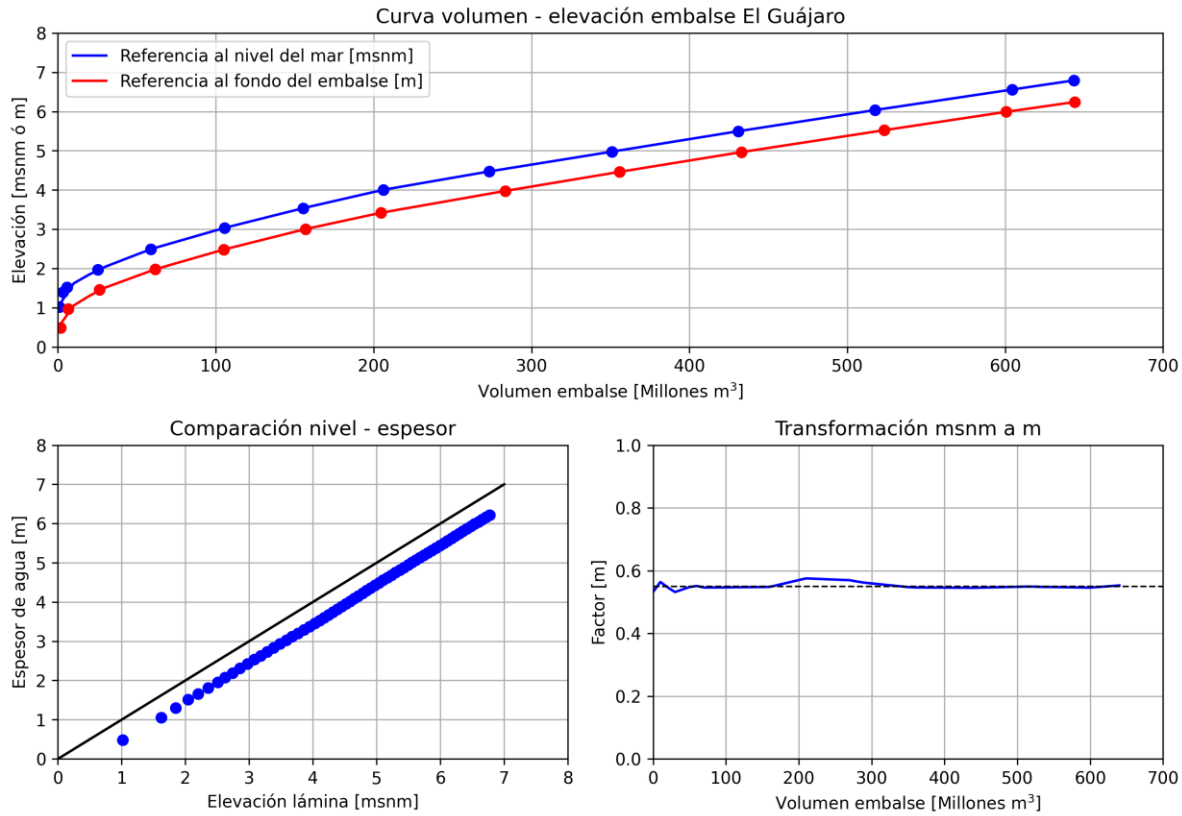


Figura 17. Curva volumen-elevación del embalse El Guájaro respecto al nivel del mar y al fondo del embalse. Fuente: Elaboración propia a partir de información recuperada desde el informe del embalse (CRA, 2012).

El embalse El Guájaro es regulado por 1) dos compuertas que controlan los flujos entre el embalse y el canal del Dique, 2) por la escorrentía generada en las subcuencas aportantes al embalse y 3) la diferencia entre la evaporación y la precipitación local. La ubicación de las compuertas (Villa Rosa y El Porvenir) se muestra en la Figura 16. La compuerta de El Porvenir se encuentra en el borde este del embalse y la compuerta Villa Rosa en el borde oeste. De esta forma, en el canal del Dique la compuerta El Porvenir se encuentra aguas arriba de la compuerta Villa Rosa. Esta configuración permite que la compuerta El Porvenir sea utilizada principalmente para ingresar agua al embalse y la compuerta Villa Rosa para extraer agua del embalse. Es importante notar que el flujo que ocurre en las compuertas es una respuesta al gradiente hidráulico entre el canal del Dique en la respectiva compuerta y el embalse; sin embargo, el flujo total de ambas compuertas no supera los 200 m^3/s (CRA,2012).

La operación del embalse El Guájaro no responde únicamente al control de inundaciones o abastecimiento de agua, sino que también a la migración de peces. El ciclo migratorio de peces está tipificado en cuatro períodos denominados subienda, bajanza, subienda de mitaca y bajanza de mitaca. Este ciclo migratorio está en parte asociado a los períodos reproductivos de las distintas especies que habitan el embalse e influyen en la producción pesquera local. A continuación, se comenta brevemente cada uno de los períodos del ciclo migratorio.

- Subienda (diciembre a marzo): Este período corresponde a la temporada seca del río Magdalena, donde los peces recorren el curso principal del río en contra de la corriente en busca de aguas claras y oxigenadas aguas arriba.
- Bajanza (desde abril): Este período corresponde al inicio de la temporada de lluvias, donde los peces retornan a las partes bajas de la cuenca del río Magdalena en busca de refugio y alimentación para el período reproductivo.

- Subienda de mitaca (julio y agosto): Este período corresponde a un período seco del río Magdalena de corta duración que ocurre entre los dos períodos húmedos del río.
- Bajanza de mitaca (septiembre a diciembre): Este período corresponde al segundo período húmedo del río Magdalena, donde los peces retornan a las partes bajas de la cuenca.

En el estudio del embalse (CRA, 2012) se propone una regla de operación que responde a un análisis hidrológico estacionario y a las necesidades tanto locales (pesca, control de inundaciones y abastecimiento de agua) como bióticas (migración de peces). Esta regla de operación se resume en la Tabla 11 con un enfoque en los niveles del embalse El Guájaro. Es importante notar que la regla de operación presentada en el informe del embalse se basa en la información de niveles entre el año 2003 y 2011 sin considerar condiciones fuera de los rangos medidos en ese período, lo que resulta en que las condicionales no sean generalizadas.

Tabla 11. Resumen de la regla de operación del embalse, vigente desde 2012.

Mes	Operación año medio	Operación año Niña	Operación año Niño
Enero	Si el embalse inicia con un nivel entre 4.7 y 5.0 m.s.n.m., vaciar hasta un nivel de 4.0 m.s.n.m.. Alcanzado el nivel, cerrar compuertas.	Si el embalse inicia con un nivel entre 4.7 y 5.0 m.s.n.m., vaciar hasta un nivel de 4.0 m.s.n.m.. Alcanzado el nivel, cerrar compuertas.	Si los niveles son mayores a 4.5. m.s.n.m, vaciar hasta un nivel de 4.2 m.s.n.m.. Alcanzado el nivel, cerrar compuertas.
Febrero Marzo Abril		Compuertas cerradas	
Mayo Junio Julio	Cuando el nivel del embalse sea de 3.5 m.s.n.m, abrir compuertas hasta un nivel de 4.0 m.s.n.m.. Alcanzado el nivel, abrir y cerrar compuertas para que nivel fluctúe entre 3.8 y 4.2 m.s.n.m.	Cuando el nivel del embalse sea de 3.5 m.s.n.m, abrir compuertas hasta un nivel de 3.8 m.s.n.m. Cerrar compuertas al alcanzar este nivel.	Cuando el nivel del embalse sea de 3.5 m.s.n.m, abrir compuertas hasta un nivel entre 4.0 y 4.2 m.s.n.m.. Alcanzado el nivel, cerrar compuertas.
Agosto	Vaciar hasta un nivel de 4.5 m.s.n.m.	Compuertas cerradas	Compuertas cerradas
Septiembre	Compuertas cerradas		
Octubre Noviembre Diciembre	Si el nivel del embalse no alcanza los 4.85 m.s.n.m por exceso de precipitaciones, llenar hasta los 4.85 m.s.n.m.	Compuertas cerradas	Si el nivel del embalse no alcanza los 5.3 m.s.n.m por exceso de precipitaciones, llenar hasta los 5.3 m.s.n.m.

Nota 1: Independiente del régimen climático, se debe permitir la entrada y salida de peces para el normal desarrollo del ciclo migratorio.
Nota 2: Se entiende que el llenado y vaciado del embalse depende de que el gradiente hidráulico entre el embalse y el canal del Dique permitan los flujos necesarios para cumplir la regla de operación.
Fuente: Adaptado de CRA (2012).

La Figura 18 muestra los niveles medidos en el embalse El Guájaro en el período 2003 – 2022, separando la situación previa y posterior a la definición de la regla de operación en el informe del embalse (CRA, 2012).

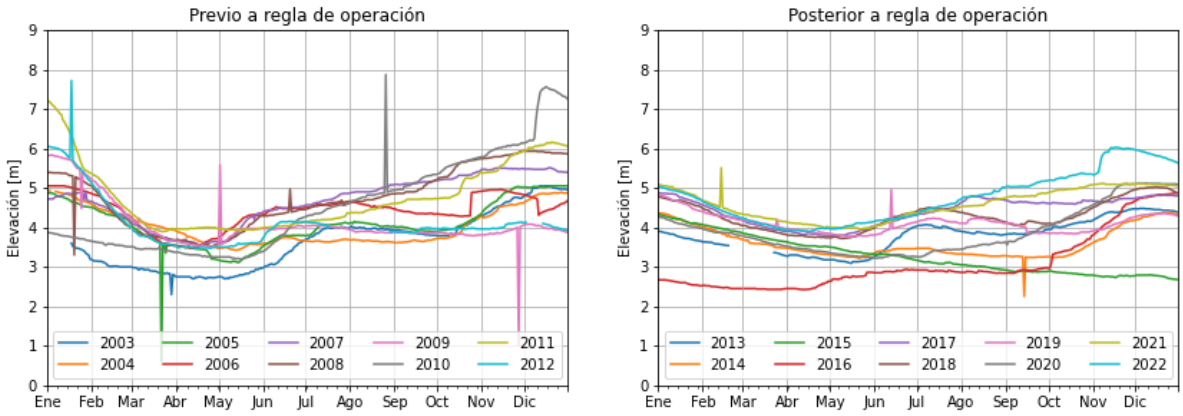


Figura 18. Niveles medidos en el embalse El Guájaro en el período 2003 – 2022.
Fuente: Elaboración propia a partir de CRA (2012).

Los niveles también muestran el impacto del desbordamiento del río Magdalena al embalse El Guájaro en el año 2010, donde hay un ascenso abrupto de 1.5 m aproximadamente. Por otro lado, respecto a los niveles posterior a la regla de operación, se observa que esta no se ha ejecutado de forma estricta ya que no se observa el cumplimiento de los umbrales objetivos y tendencias definidas. Sin embargo, esto responde a que la apertura y cierre de compuertas está sujeta a factores socio-ecológicos que no siempre permiten lograr los umbrales objetivos.

3.2.2. Red de monitoreo de variables hidro-climáticas

La CRA no cuenta con una red de monitoreo de variables hidro-climáticas, a excepción de la información de niveles estáticos de agua subterránea medidos durante el desarrollo del informe de acuíferos del Departamento del Atlántico el año 2015 (CRA, 2015) (Figura 12). Sin embargo, IDEAM posee información en la zona, la cual se recopiló a escala diaria. Las variables recopiladas fueron:

- Brillo solar (3 estaciones)
- Humedad relativa (9 estaciones)
- Velocidad del viento (7 estaciones)
- Temperatura (9 estaciones)
- Precipitación (50 estaciones)
- Caudal superficial (9 estaciones)

La distribución espacial de las estaciones recopiladas se presenta en la Figura 19 y la cantidad de datos o estaciones activas en cada día del período de registro se presenta en la Figura 20.

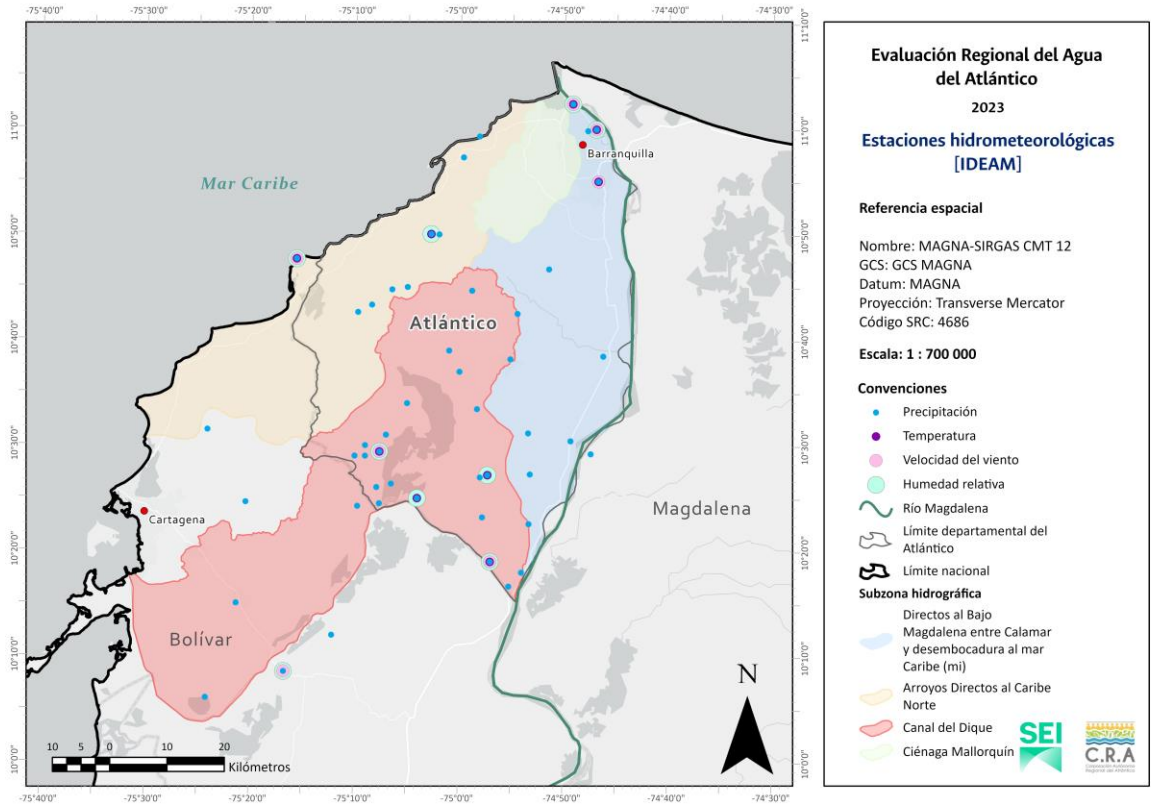


Figura 19. Ubicación de las estaciones hidro-meteorológicas recopiladas de IDEAM y puntos de con información de niveles de agua subterránea.
Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM, portal Dhime: http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/.

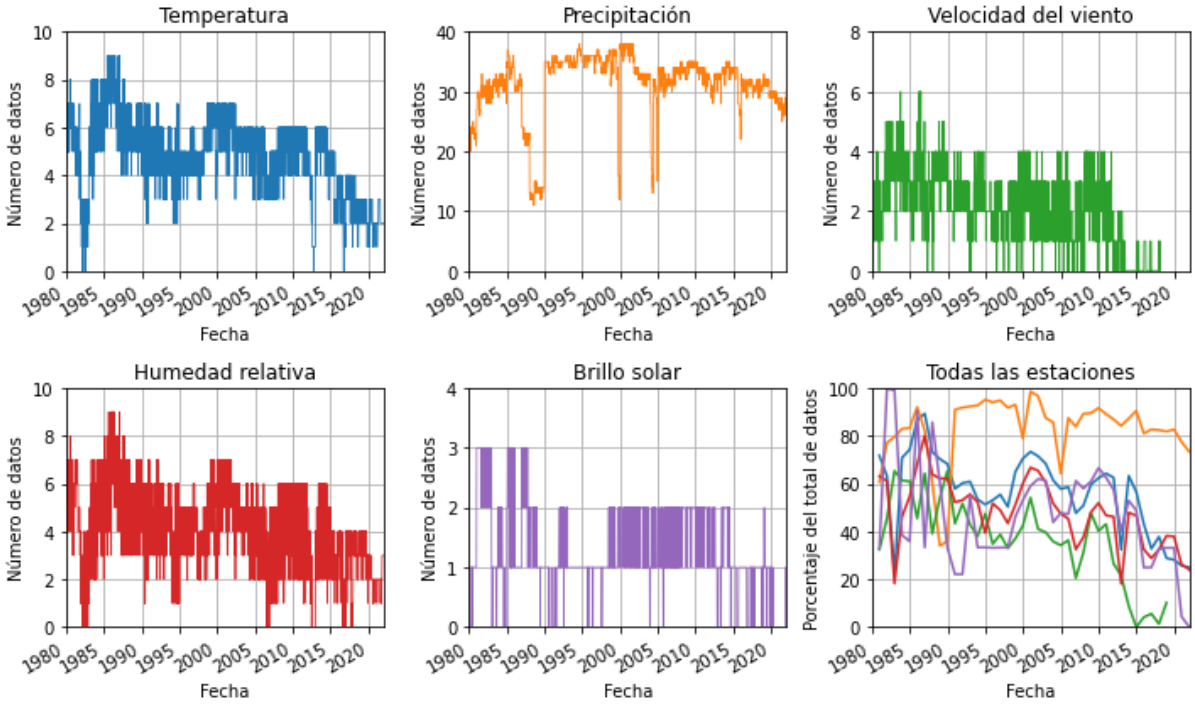


Figura 20. Número de observaciones diarias en el período 1980 – 2022 en las estaciones hidro-climáticas recopiladas.
Nota: En el panel de "Todas las estaciones" se presenta un promedio anual del porcentaje diario.
Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM, portal Dhime: http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/.

En el Departamento del Atlántico la información hidro-climática disponible es limitada. Espacialmente, las estaciones de brillo solar, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura se distribuyen cerca de los límites del Departamento. Por otro lado, las estaciones de precipitación presentan una mayor distribución dentro del Departamento. Respecto a las estaciones de caudales, estas se encuentran en los límites del Departamento del Atlántico, a lo largo del canal del Dique y en el río Magdalena, previo a la canalización del canal del Dique (estación Calamar). No hay información de caudales en los arroyos o causes superficiales existentes dentro del Departamento del Atlántico. En términos de continuidad temporal de los registros, la Figura 20 muestra que hay intermitencia en la recolección de datos y que son pocos los días donde se tiene información en todas las estaciones.

3.3. Clima

En esta sección se presenta la caracterización del clima histórico en base a las estaciones climáticas presentadas en la sección 3.2.2. Adicionalmente, se presentan las proyecciones de cambio climático del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC por sus siglas en inglés), publicados en el año 2021.

3.3.1. Caracterización climática histórica

Para la caracterización del clima histórico se consideró información del período 1980 – 2022 en base a las estaciones IDEAM, presentadas en la sección 3.2.2. Un adecuado desarrollo de la ERA requiere de una regionalización de la precipitación y temperatura y otras variables relevantes. Sin embargo, debido a la poca información espaciotemporal disponible para humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar, estas variables no se regionalizaron; sino que se caracterizaron de forma general para todo el Departamento del Atlántico. A continuación, se presenta el proceso de regionalización de precipitación y temperaturas para el Departamento del Atlántico y, luego, se presenta la caracterización de la humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar.

3.3.1.1. Precipitación y temperatura

Para regionalizar las variables precipitación y temperatura se requieren series continuas en el tiempo, lo cual no ocurre en ninguna de las estaciones de precipitación o temperatura para el período 1980 – 2022. Debido a esto, se recurrió a rellenar la información faltante, considerando únicamente las estaciones que tengan al menos 50% de los datos en el período 1980 – 2022. Las estaciones que cumplen con este requisito se muestran en la Figura 21.

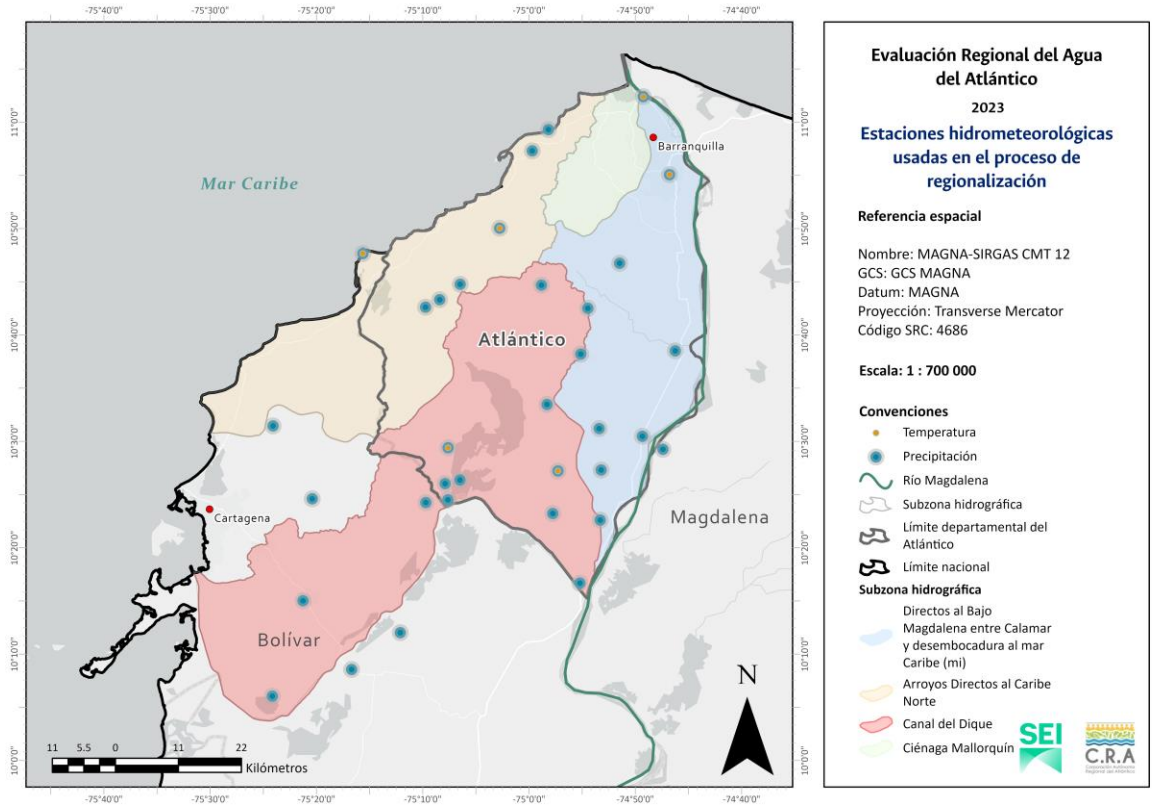


Figura 21. Estaciones de precipitación y temperaturas con más del 50% de los datos en el período 1980 – 2022.
Fuente: Elaboración propia.

Previo a realizar el relleno de estaciones, se revisó las correlaciones entre estaciones y entre variables, además de la relación entre el valor promedio multianual y aspectos geográficos como la latitud, longitud y elevación del terreno. Esta información se presenta en la Figura 22.

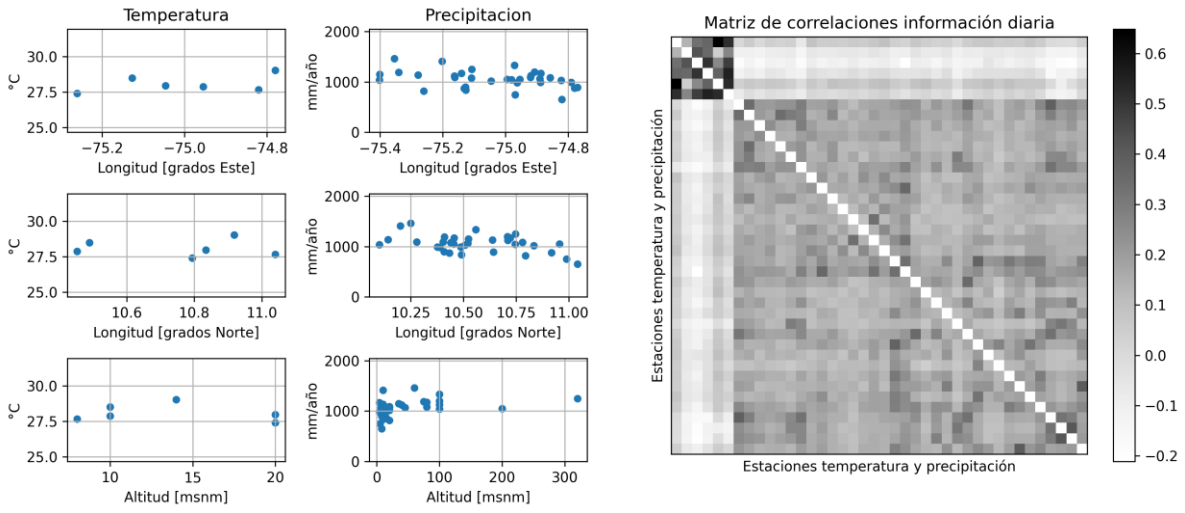


Figura 22. Relación entre variables y condición geográfica y correlación entre variables y estaciones.
Nota: En la matriz de correlaciones se omitieron los valores de la diagonal, correspondientes a correlación 1.
Fuente: Elaboración propia.

La máxima correlación entre estaciones o variables es de 0.65; sin embargo, el promedio es menor a 0.2, por lo que se consideró la existencia de una correlación relevante entre estas. Adicionalmente, no se observan tendencias fuertes y con poca variabilidad entre los valores agregados promedio multianual y las condiciones geográficas, por lo que se descarta la posibilidad de realizar un cruce directo entre estaciones o variables para realizar el relleno de información. Una segunda alternativa es la comparación con productos grillados de clima.

En este estudio se comparó la información de temperatura con el producto ERA5-Land [6] y la información de precipitación con los productos ERA5-Land, CHIRPS[7] y MSWEP[8]. Sin embargo, el ajuste de estos productos a las observaciones es bajo tanto a escala diaria, mensual y anual como en términos de la variación estacional diaria. La Figura 23 presenta estadísticos de ajuste para las condiciones previamente mencionadas. Los estadísticos utilizados corresponden al coeficiente de correlación (r^2), el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe Normalizado ($NNSE = 1/(2 - NSE)$) y la raíz del error cuadrático medio normalizado ($NRMSE$).

[6] ERA5-Land: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview.

[7] CHIRPS: https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps.

[8] MSWEP: https://www.gloh2o.org/mswep/.

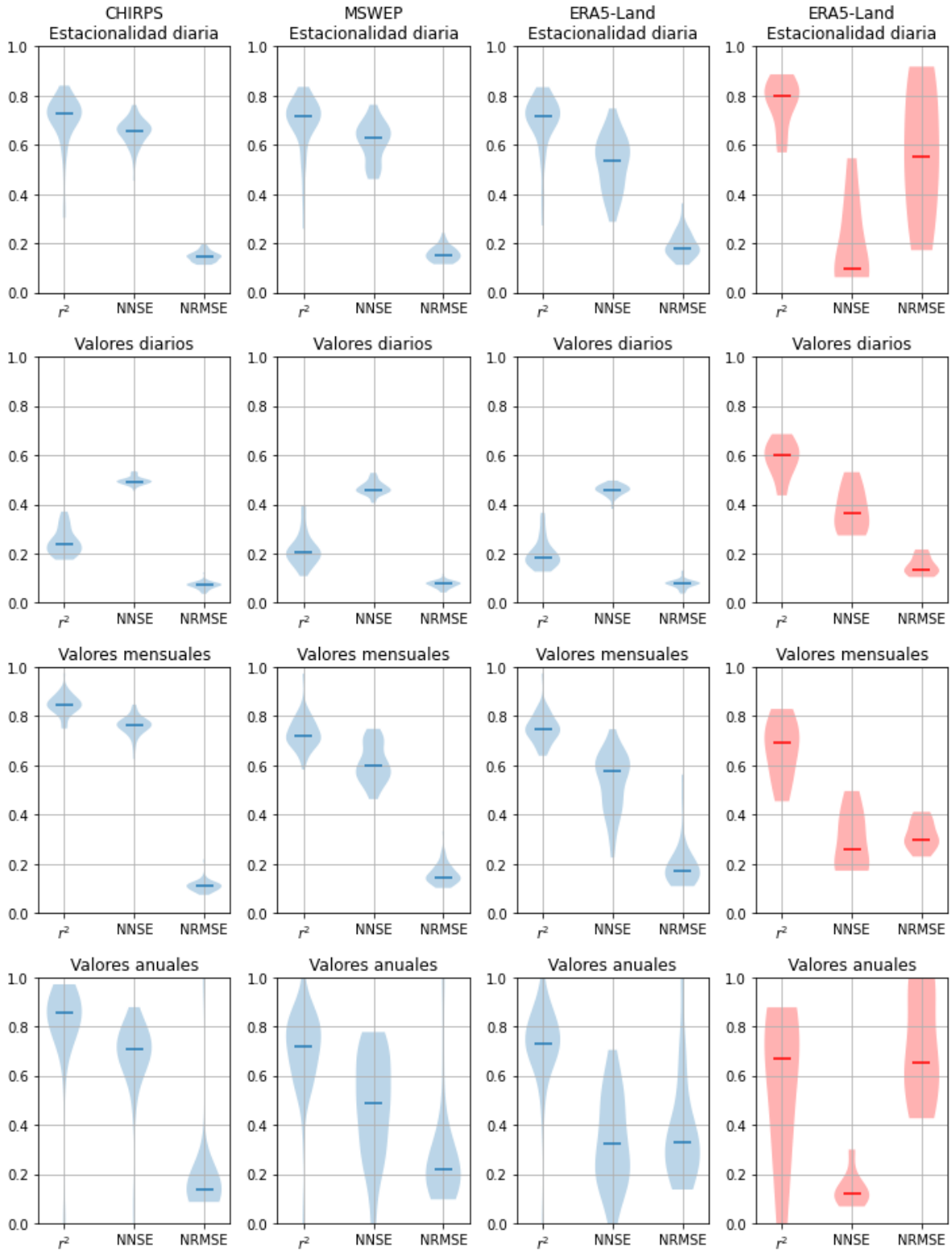


Figura 23. Diagrama de violín de los estadísticos de ajuste para analizar la representatividad de los productos grillados de clima histórico (1981 – 2020) a los datos observados de precipitación y temperatura.

Nota 1: Colores azules representan precipitación y rojo temperaturas.

Nota 2: Valores de $r^2 = 1$, $NNSE = 1$ y $NRMSE = 0$ indican un ajuste perfecto; valores indican una degradación del ajuste $r^2 < 1$, $NSE < 1$ y $NRMSE > 0$.

Fuente: Elaboración propia.

En base a estos resultados anteriores, se decidió rellenar los valores faltantes con el método k-NN (k-vecinos cercanos). El método k-NN puede usarse para desagregar información de una escala gruesa a una más fina o generar información nueva en función de lo que ya ha ocurrido en una cierta cantidad de períodos de tiempo, entre otras cosas. En este caso se utilizó el método k-NN para completar los datos faltantes en función de lo que ya ha ocurrido. De esta forma, el procedimiento general se puede resumir de la siguiente forma:

1. Para el período o día con datos faltantes, comparar la información existente en el período anterior con todos los días de la base de datos
2. Seleccionar un set de períodos con la menor diferencia con la información comparada en el paso anterior
3. Seleccionar aleatoriamente uno de los períodos seleccionados en el paso anterior (los períodos con menor diferencia se les asigna mayor probabilidad)
4. Rellenar los datos faltantes con la información del período posterior al período seleccionado en el paso anterior

Es importante notar que una de las restricciones del procedimiento es que debe existir información para las estaciones faltantes en período posterior al escogido en el paso 3. Caso contrario, se volverá a tener estaciones sin datos y no se lograría el objetivo del relleno.

El proceso de relleno se realizó de forma conjunta considerando tanto las estaciones de precipitación como de temperatura. De esta forma, se obtuvieron series completas cuya correlación espacial y entre variables, autocorrelación y variación estacional es consistente con las de las series originales. Las series resultantes a escala diaria y anual se presentan en la Figura 24 y Figura 25, respectivamente. En estas figuras se puede observar también que no hay correlaciones fuertes entre estaciones y variables.

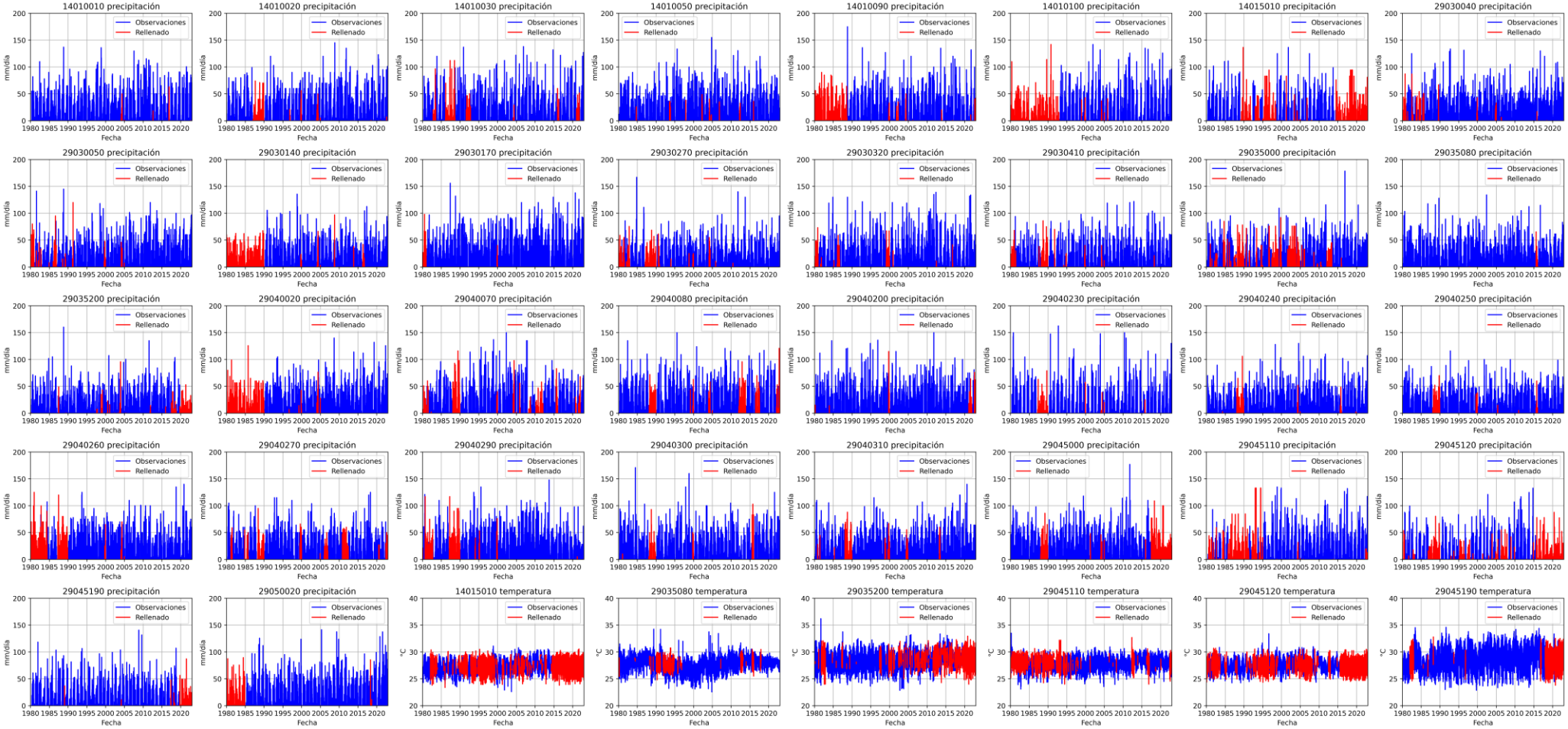


Figura 24. Comparación de series de precipitación y temperatura originales y rellenadas a escala diaria.
Nota: En azul se muestran los valores originales y en rojo los valores rellenados.
Fuente: Elaboración propia.

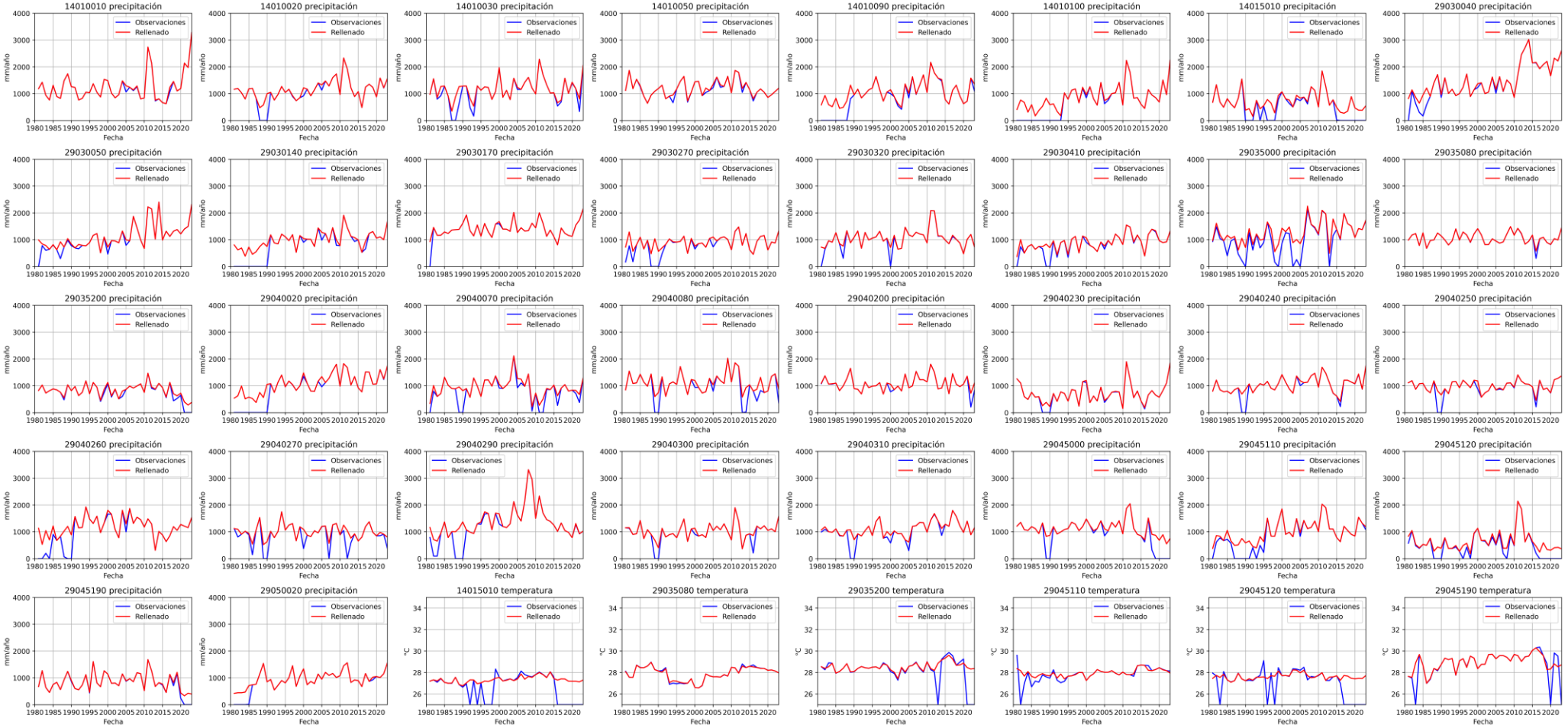


Figura 25. Comparación de series de precipitación y temperatura originales y rellenadas a escala anual.

Nota 1: En azul se muestran los valores originales y en rojo los valores rellenados.

Nota 2: Para las series originales (azul), los valores bajos para precipitación están asociados a pocos valores para la suma anual y los valores nulos en temperatura corresponden a que no hay datos de temperaturas ese año.

Fuente: Elaboración propia.

Las series rellenadas no presentan saltos abruptos y logran consistencia en los patrones de las series originales. Adicionalmente, en los períodos largos sin información se observan valores rellenados consistentes con los períodos previos y posteriores tanto en precipitaciones como en temperaturas. En términos de la variación estacional, la Figura 26 muestra cambios que no perturban los órdenes de magnitud tanto de los promedios diarios como mensuales. En el caso de la desviación estándar, se observa un aumento en la variabilidad en la precipitación de los días secos, sin embargo, a escala mensual esta influencia no es notoria. Esto está asociado al relleno de días que tienen varios vacíos en las series originales; sin embargo, a escala mensual los volúmenes totales mantienen su variabilidad, lo que es satisfactorio, considerando los alcances y las características de los datos.

En cuanto a correlaciones entre variables, la Figura 27 muestra la matriz de correlaciones antes y después del relleno de las estaciones. Las correlaciones presentan cambios en magnitud, sin embargo, mantienen el patrón general que inicialmente tenían las observaciones.

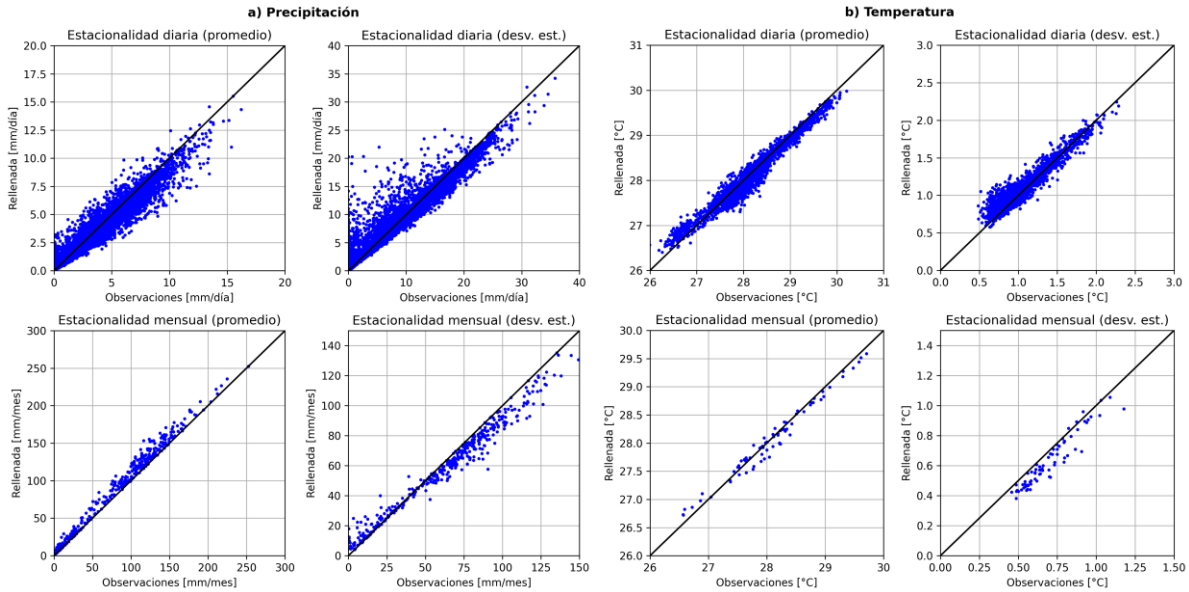


Figura 26. Comparación de la estacionalidad de las series originales y rellenadas. a) Precipitación y b) temperatura. Fuente: Elaboración propia.

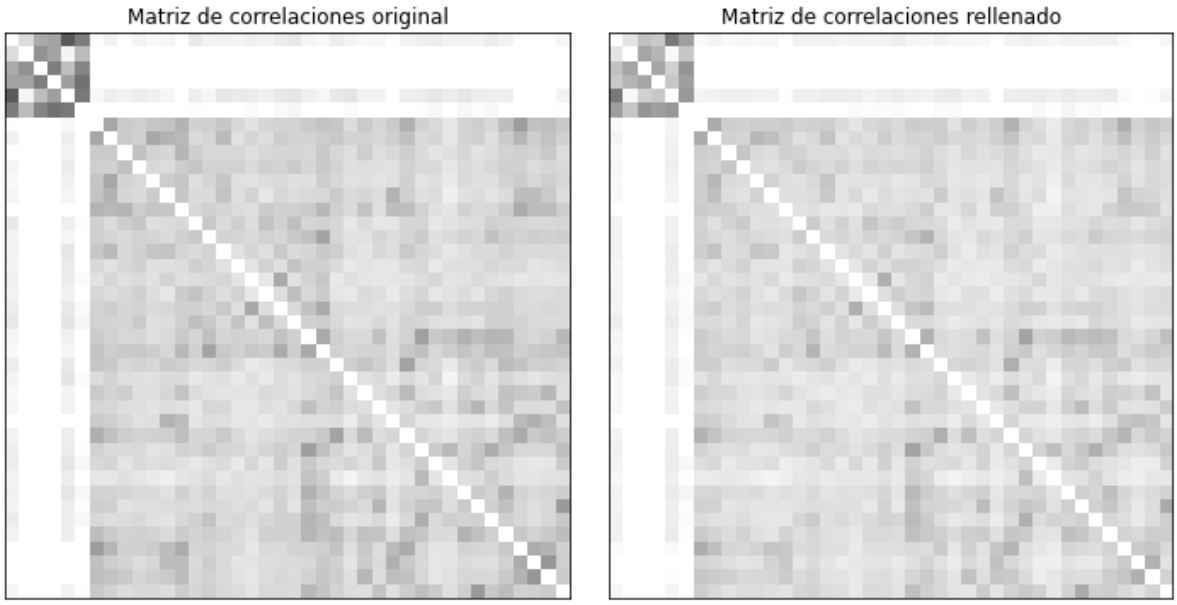


Figura 27. Comparación del patrón de la matriz de correlaciones antes y después del relleno de series.
Nota 1: En la matriz de correlaciones se omitieron los valores de la diagonal, correspondientes a correlación 1.
Nota 2: Color negro representa correlación de 1 y color blanco correlación menor a 0 (sin considerar la diagonal).
Fuente: Elaboración propia.

A partir de las estaciones rellenas y continuas en el período 1980 – 2022 se realizó la regionalización de la precipitación y temperatura, por separado, a una resolución de 1,000 m. La metodología para la regionalización corresponde al método inverso de la distancia al cuadrado (IDW por sus siglas en inglés, considerando un factor de orden 2). Este método busca interpolar y extrapolar la información climática, priorizando la información más cercana a cada punto. De esta forma, se generó una grilla uniforme y para cada celda de la grilla, la serie de tiempo de la variable a regionalizar se expresa como:

$$x_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^{n_e} w_{i,j} o_j(t)}{\sum_{j=1}^{n_e} w_{i,j}} \quad ; \quad w_{i,j} = \left(\frac{1}{d_{i,j}}\right)^2$$

donde $x_i(t)$ es el valor de la variable a regionalizar en la celda i de la grilla, para un instante de tiempo t; $o_j(t)$ es el valor de la variable a regionalizar en la estación j, para un instante de tiempo t; $d_{i,j}$ es la distancia entre el centroide de la celda i y la estación j; $w_{i,j}$ es el peso o factor ponderador asociado a la celda i y la estación j; y n_e es el número de estaciones disponibles para la variable a regionalizar.

El resultado de la regionalización es un producto grillado o cubo de tres dimensiones: latitud, longitud y tiempo. Este producto grillado contiene toda la información espaciotemporal de precipitación o temperatura para el Departamento del Atlántico y se almacena en formato netcdf (network Common Data Form). La estructura de este formato se presenta en la Figura 28. Los archivos netcdf almacenan información en formato binario, por lo que son más livianos que un archivo de texto, pero hace que su lectura no sea básica; sin embargo, es un formato en constante desarrollo en la comunidad científica y puede ser analizado en diversos Sistemas de Información Geográfica como QGIS o ArcGIS y en distintos lenguajes de programación como Python, R o Matlab.

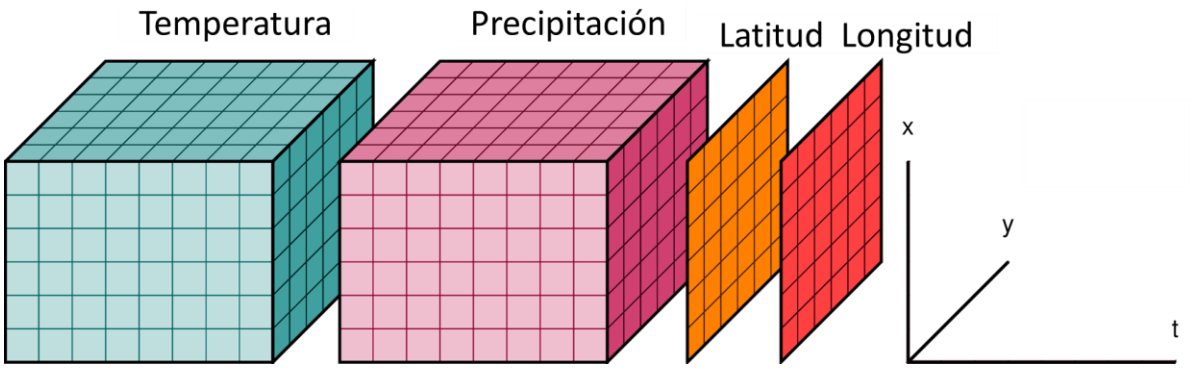


Figura 28. Esquema del formato netcdf.
Fuente: Modificado de https://www.guillaumedueymes.com/courses/tutorial_python_netcdf/1-netcdf_tutorial/.

A partir de la regionalización, la Figura 29 y Figura 30 muestra la distribución espacial de los promedios multianual de precipitación y temperatura, respectivamente, para el Departamento del Atlántico. La Figura 31 muestra la variación estacional y agregados anuales de la precipitación y temperatura de cada una de las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico.

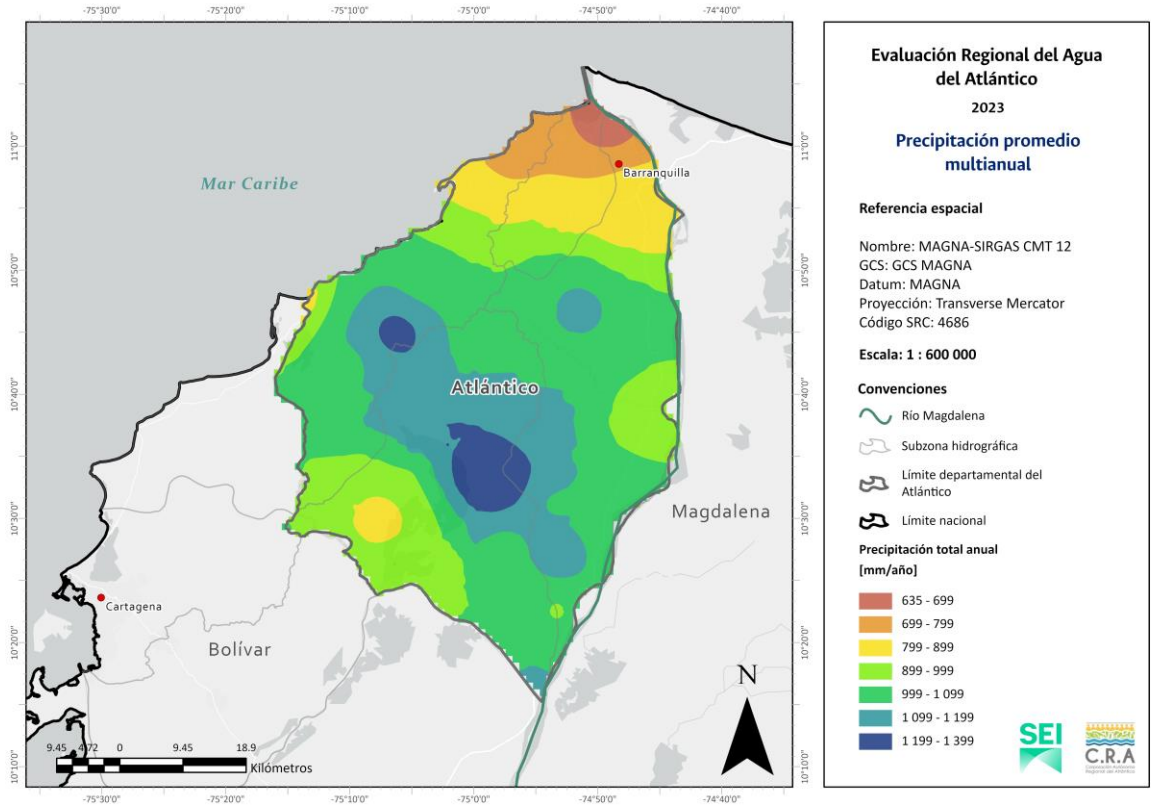


Figura 29. Precipitación promedio multianual distribuida en el Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia.

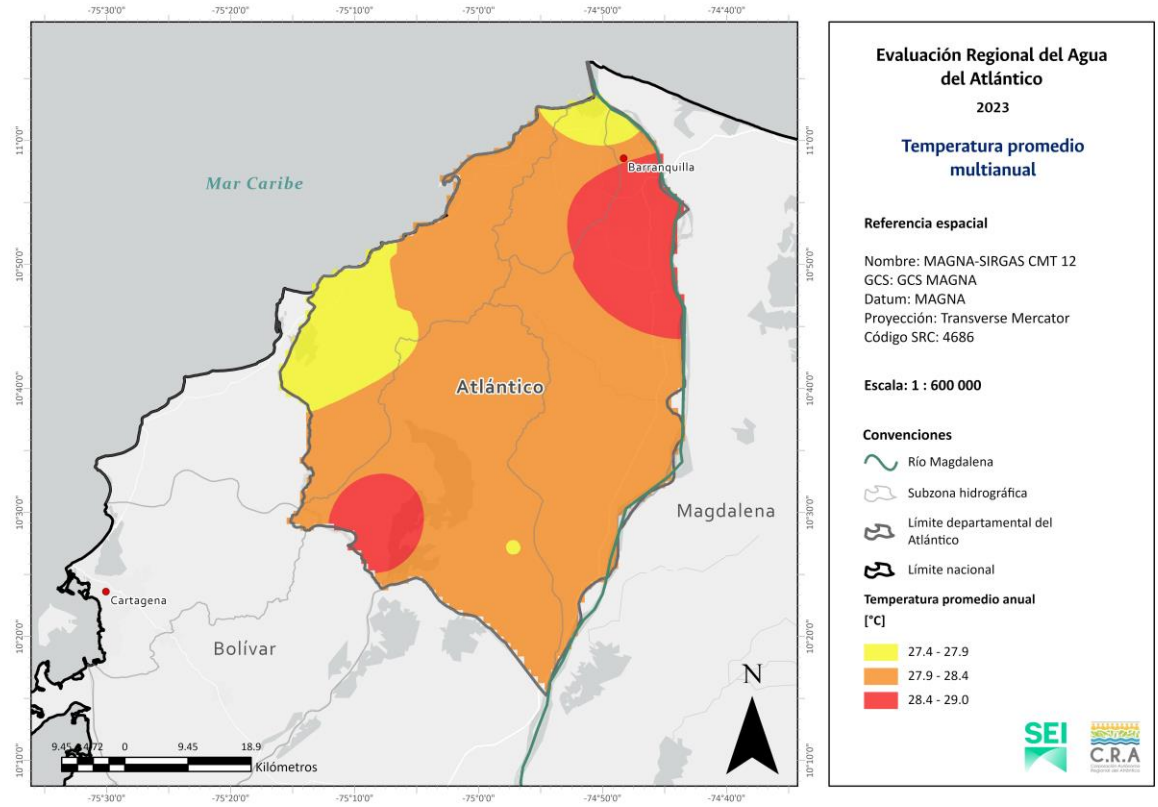


Figura 30. Temperatura promedio multianual distribuida en el Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia.

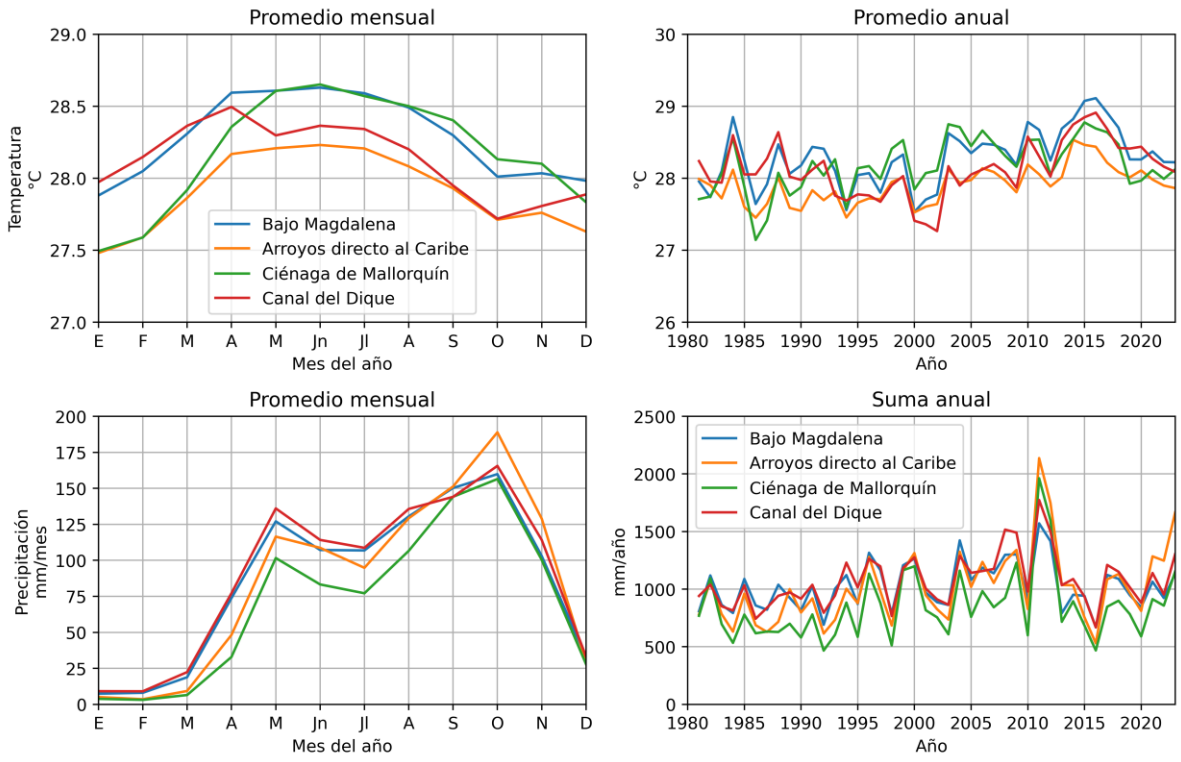


Figura 31. Temperatura (arriba) y precipitación (abajo) promedio mensual y agregado anual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas medias en el Departamento del Atlántico están entre los 27.5 y 29.0 °C, siendo localmente el sector nor-oriente el más cálido del Departamento y el extremo norte y sector poniente los menos cálidos. En términos de la variabilidad estacional, las subzonas Mallorquín, Magdalena y Caribe presentan estacionalidades similares, donde las temperaturas mínimas se alcanzan en enero y las máximas se alcanzan en abril y se mantienen hasta julio. En el caso de la subzona canal del Dique margen derecho, las temperaturas mínimas se alcanzan en octubre y las máximas en abril. En términos de tendencias, las 4 subzonas presentan un aumento en temperaturas en la última década.

La precipitación total anual promedio en el Departamento del Atlántico toma valores entre los 600 y 1,300 mm/año, siendo localmente el sector al norte del embalse El Guájaro el con mayores precipitaciones del Departamento y el extremo norte el con menores precipitaciones. A modo general, se observa un gradiente de precipitación desde la zona más húmeda (sector norte del embalse El Guájaro) hacia los bordes del Departamento. En términos de la variabilidad estacional, la precipitación en las cuatro subzonas presenta un comportamiento bimodal donde el período seco ocurre entre enero y marzo, el primer período húmedo ocurre en mayo y el segundo período húmedo (más húmedo que el primero) ocurre en octubre. La precipitación promedio en octubre es de entre 150 y 200 mm/mes. En términos de tendencias, las 4 subzonas presentan un aumento en precipitaciones en la última década.

3.3.1.2. Humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar

La estimación de las variables humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar se realizó tomando el promedio de los promedios diario multianual de los datos en el período 1980 – 2022, el cual se consideró representativo para toda el área del Departamento del Atlántico. Esto, debido a la poca información espacio-temporal para desarrollar una regionalización más detallada como la que fue solicitada para precipitación y temperatura. Adicionalmente, la variable de brillo solar se transformó en fracción nubosa.

La información de velocidad de viento que maneja IDEAM se mide comúnmente a 10 m por sobre el nivel del terreno; sin embargo, las fórmulas comunes para análisis hidro-climático se basan en la velocidad del viento medido a 2 m por sobre el nivel del terreno. Es por esto por lo que se realizó una corrección en base a la ley logarítmica del perfil de velocidad de viento (Campbell y Norman, 1998), considerando una altura de desplazamiento cero de 8 cm y el parámetro de rugosidad de 1.5 cm. La ecuación resultante es:

$$v_2 = v_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

donde v_2 es la velocidad del viento a 2 m sobre el nivel del terreno, en m/s; v_z es la velocidad del viento a z metros sobre el nivel del terreno, en m/s; y z es la altura de medición sobre el nivel del terreno, en m, la cual en este caso corresponde a 10 m.

La información de fracción nubosa se calculó a partir de la información medida de brillo solar en las estaciones con las siguientes fórmulas de FAO (Allen et al., 1998).

$$F = \frac{n}{N} \quad ; \quad N = \frac{24}{\pi}\omega \quad ; \quad \varphi = \frac{\pi}{180} lat$$

$$\omega = arcos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad ; \quad \delta = 0.409\sin\left(\frac{2\pi}{265}J - 1.39\right)$$

donde F corresponde a la fracción nubosa, n corresponde a las horas de brillo solar, N corresponde a la duración máxima de insolación, φ representa la latitud de la estación en radianes, lat corresponde a la latitud de la estación en grados, J el número del día el año calendario considerando valores entre 1 y 365 entre el 1 de enero y 31 de diciembre. Valores de $F = 0$ indican nubosidad total y $F = 1$ indican nula presencia de nubes.

La caracterización de la humedad relativa, velocidad del viento a 2 metros de altura y fracción nubosa para el Departamento del Atlántico se presenta en la Figura 32.

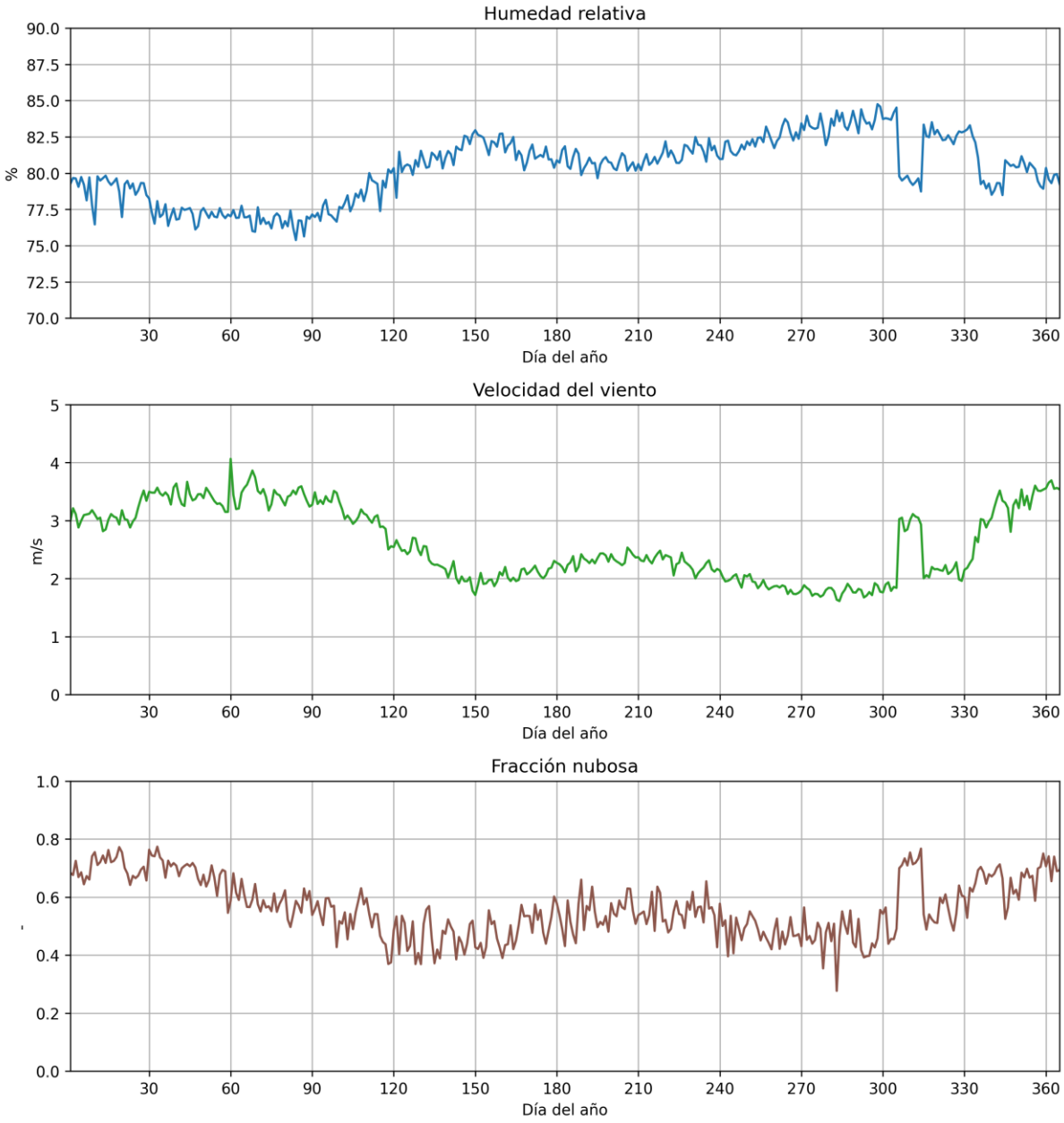


Figura 32. a) Humedad relativa, b) velocidad del viento a 2 m del suelo y c) fracción nubosa en el Departamento del Atlántico. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran una relación inversa fuerte entre la humedad relativa y velocidad del viento, lo cual es consistente con los procesos físicos que las relacionan. Adicionalmente, en el Departamento del Atlántico se observa también una relación entre la velocidad del viento y la fracción nubosa. Las tres variables climáticas muestran un comportamiento bimodal. Respecto a la humedad relativa, los promedios diarios oscilan entre 76 y 86%, siendo marzo el mes menos húmedo y octubre el más húmedo. Caso contrario ocurre con la velocidad del viento, donde los vientos más fuertes ocurren en marzo con promedios diarios de 3.5 m/s y los más suaves ocurren en octubre con promedios diarios de 1.75 m/s. Por otro lado, la fracción nubosa toma los valores más bajos, cercanos a 0.45, en mayo (días menos soleados) y los más altos, cercanos a 0.7, en enero (días más soleados).

Es importante notar los resultados para los primeros días de noviembre, donde hay una disminución abrupta en la humedad relativa y un aumento abrupto tanto en la velocidad del viento como en la fracción nubosa. Estos cambios abruptos no son resultado de alguna anomalía en los datos, sino que se observa en las distintas estaciones y en distintos años, además de que la relación entre las variables se mantiene consistente en este período. Este aspecto fue socializado en el taller asociado a la validación de la información y los participantes comentaron que, cualitativamente, es un fenómeno que se siente en el Departamento del Atlántico.

3.3.2. Proyecciones futuras de clima

El clima futuro es un factor de incertidumbre relevante en torno a la gestión del recurso hídrico, más aún, cómo evolucionará el clima y cómo este afectará la disponibilidad hídrica futura es una incógnita importante por considerar. Una alternativa para abordar esta incertidumbre es la generación de clima sintético o estocástico con distintos supuestos de los cambios futuros en las variables climáticas; sin embargo, las combinaciones a evaluar son infinitas y pueden ser arbitrarias, sin responder a una dinámica atmosférica-oceánica acoplada.

En la actualidad, los modelos de circulación general o modelos de clima global (GCM por sus siglas en inglés) son la herramienta con mayor avance científico en términos de dinámica oceánica y atmosférica para la representación del clima pasado y proyección del clima futuro ante forzantes como las emisiones de gases de efecto invernadero. Los GCM corresponden a modelos numéricos de simulación que representan los océanos y atmósfera como una grilla en el espacio (horizontal y verticalmente) y calculan los flujos entre ellas en base a leyes de conservación de masas, energía y cantidad de movimiento para representar el clima del planeta y sus variaciones espaciotemporales[9].

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) es la entidad de la Naciones Unidas, compuesta por investigadores y centros de investigaciones de todo el mundo, que promueve el desarrollo científico en torno al cambio climático, las implicancias políticas, sus impactos y potenciales medidas de mitigación y adaptación. El IPCC actualiza de forma periódica Informes de Evaluación (AR por sus siglas en inglés), incluyendo la publicación de escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y los resultados de los GCM sometidos a estos escenarios. Al mismo tiempo, los GCM son actualizados periódicamente en función de la información y conocimiento disponible, además de la capacidad computacional para representar de mejor manera el planeta. Por esto, se recomienda priorizar los AR más recientes para analizar escenarios de clima futuro. En este estudio

[9] https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work/.

se considerará la información del sexto Informe de Evaluación o AR6, el AR más actual a la fecha, que fue publicado en el año 2021.

Es importante notar que los escenarios presentados por el IPCC y los resultados de los GCM no son proyecciones ni sugerencias de lo que ocurrirá en el futuro, sino que un conjunto de posibles configuraciones futuras que responden a una dinámica atmosférica-oceánica acoplada. Sin embargo, tanto los escenarios como los modelos son ampliamente revisados por la comunidad científica, por lo que estos pueden considerarse como una alternativa para reducir la incertidumbre frente a las posibles combinaciones de variables climáticas a analizar.

3.3.2.1. Proyecciones climáticas a partir del sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (AR6-IPCC)

El sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6), publicado en el año 2021, propone escenarios climáticos que responden a Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés), las cuales combinan factores socioeconómicos con las forzantes radiativas propuestas en el AR5, publicado en el año 2008. Las forzantes radiativas corresponden al aporte radiativo (en W m^{-2}) desde la atmósfera hacia la Tierra, producto de la acumulación de gases de efecto invernadero, proyectado al año 2100, respecto al período pre-industrial. De esta forma, los escenarios climáticos del AR6 siguen la siguiente nomenclatura: SSPX-Y, donde **X** es el escenario socio económico e **Y** es la forzante radiativa. Las Trayectorias Socioeconómicas se basan en cinco narrativas principales, y se presentan a continuación. En la Figura 33 se presenta un mapa conceptual de las narrativas en relación con el nivel de desafíos en torno a mitigación y adaptación.

- SSP1: Un mundo de crecimiento e igualdad centrado en la sostenibilidad
- SSP2: Un mundo a “mitad del camino” donde las tendencias siguen ampliamente sus patrones históricos
- SSP3: Un mundo fragmentado de “nacionalismo resurgente”
- SSP4: Un mundo de desigualdad cada vez mayor
- SSP5: Un mundo de crecimiento rápido y sin restricciones en la producción económica y el uso de la energía, enfocado principalmente en el desarrollo basado en combustibles fósiles

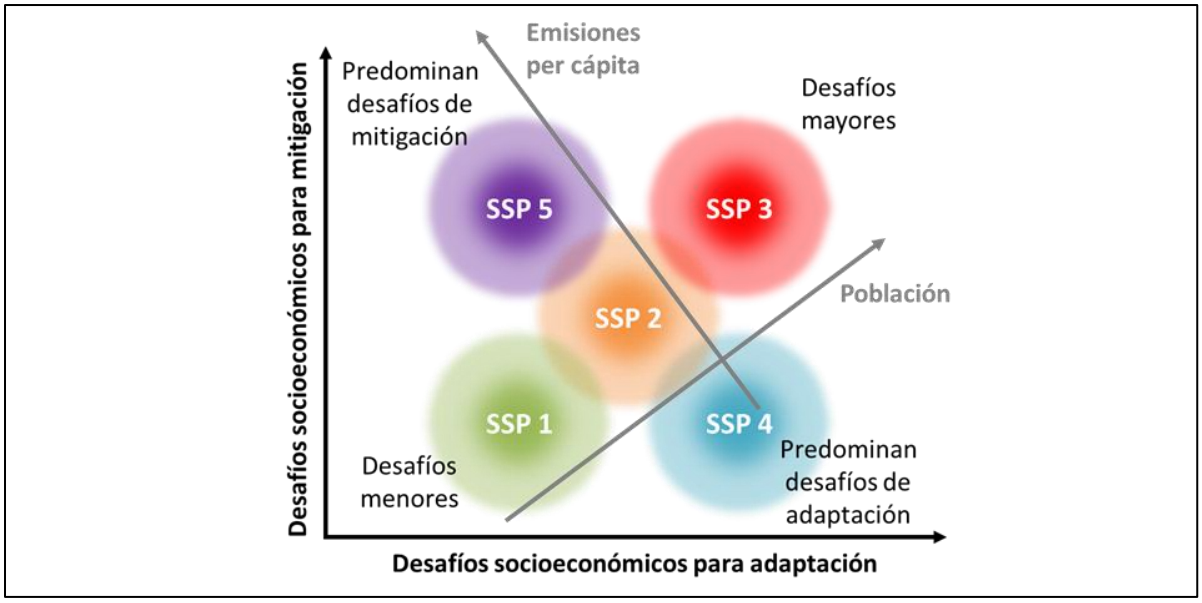


Figura 33. Mapa conceptual de las narrativas de los escenarios SSP del AR6-IPCC en relación con el nivel de desafíos en torno a mitigación y adaptación.
Fuente: Modificado de O'Sullivan (2018).

Los escenarios prioritarios en el AR6 son los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (O'Neill et al., 2016):

- SSP1-2.6: Este escenario asume un desarrollo compatible con el objetivo de no superar un aumento en temperaturas de 2 °C en base a acciones de mitigación al cambio climático en combinación con un escenario de emisiones optimista y una forzante radiativa de 2.6 W m^{-2} al año 2100.
- SSP2-4.5: Este escenario corresponde a un punto medio en términos de mitigación al cambio climático y emisiones de gases de efecto invernadero y una forzante radiativa de 4.5 W m^{-2} al año 2100.
- SSP3-7.0: Este escenario representa un punto medio de los escenarios pesimistas, considerando una alta vulnerabilidad social, rivalidad regional, un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y una forzante radiativa de 7.0 W m^{-2} al año 2100.
- SSP5-8.5: Este escenario representa el escenario más pesimista descrito en la literatura, siendo el escenario SSP5 el único factible de producir una forzante radiativa de 8.5 W m^{-2} al año 2100.

La Tabla 12 presenta los 41 GCMs disponibles en el AR6 y los escenarios en que cada uno fue evaluado. La Figura 34 presenta las proyecciones o tendencias (crudas o sin escalamiento) para la temperatura media anual y precipitación total anual para el Departamento del Atlántico, tomando como referencia el período 1985 – 2014. Se consideró el período 1985 – 2014 como referencia debido a que el período histórico de los modelos del AR6 termina el año 2014 y 30 años es un rango estándar para analizar las tendencias y variabilidad del clima histórico y proyectado. Adicionalmente, la Figura 34 presenta de forma conjunta el cambio proyectado para cada uno de los modelos y escenarios en el período 2011 - 2040 y 2041 – 2070, períodos de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático para Colombia (IDEAM, 2017), representando un futuro cercano y lejano, respectivamente. Notar que solo se consideraron los ensambles r1i1p1f1 de los GCM, asociados a las realizaciones principales de los GCM.

Tabla 12. GCM del AR6-IPCC y escenarios analizados.

Modelo	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
ACCESS-CM2	X	X	X	X
ACCESS-ESM1-5	X	X	X	X
AWI-CM-1-1-MR	X	X	X	X
BCC-CSM2-MR	X	X	X	X
BCC-ESM1			X	
CAMS-CSM1-0	X	X	X	X
CAS-ESM2-0	X	X	X	X
CESM2-WACCM	X	X	X	X
CIESM	X	X		X
CMCC-CM2-SR5	X	X	X	X
CMCC-ESM2	X	X	X	X
CanESM5	X	X	X	X
CanESM5-1				X
E3SM-1-0				X
E3SM-1-1		X		X
E3SM-1-1-ECA				X
EC-Earth3	X	X	X	X
EC-Earth3-AerChem			X	
EC-Earth3-CC		X		X
EC-Earth3-Veg	X	X	X	X
EC-Earth3-Veg-LR	X	X	X	X
FGOALS-f3-L	X	X	X	X
FGOALS-g3	X	X	X	X
FIO-ESM-2-0	X	X		X
GFDL-ESM4	X	X	X	X
IITM-ESM	X	X	X	X
INM-CM4-8	X	X	X	X
INM-CM5-0	X	X	X	X
IPSL-CM5A2-INCA	X		X	
IPSL-CM6A-LR	X	X	X	X
KACE-1-0-G	X	X	X	X
KIOST-ESM	X	X		X
MIROC6	X	X	X	X
MPI-ESM-1-2-HAM			X	
MPI-ESM1-2-HR	X	X	X	X
MPI-ESM1-2-LR	X	X	X	X
MRI-ESM2-0	X	X	X	X
NESM3	X	X		X
NorESM2-LM	X	X	X	X
NorESM2-MM	X	X	X	X
TaiESM1	X	X	X	X

Nota 1: Solo se consideraron los ensambles r1i1p1f1.
Nota 2: El símbolo X denota la existencia del escenario y modelo asociado a la ubicación en la tabla.
Fuente: Elaboración propia.

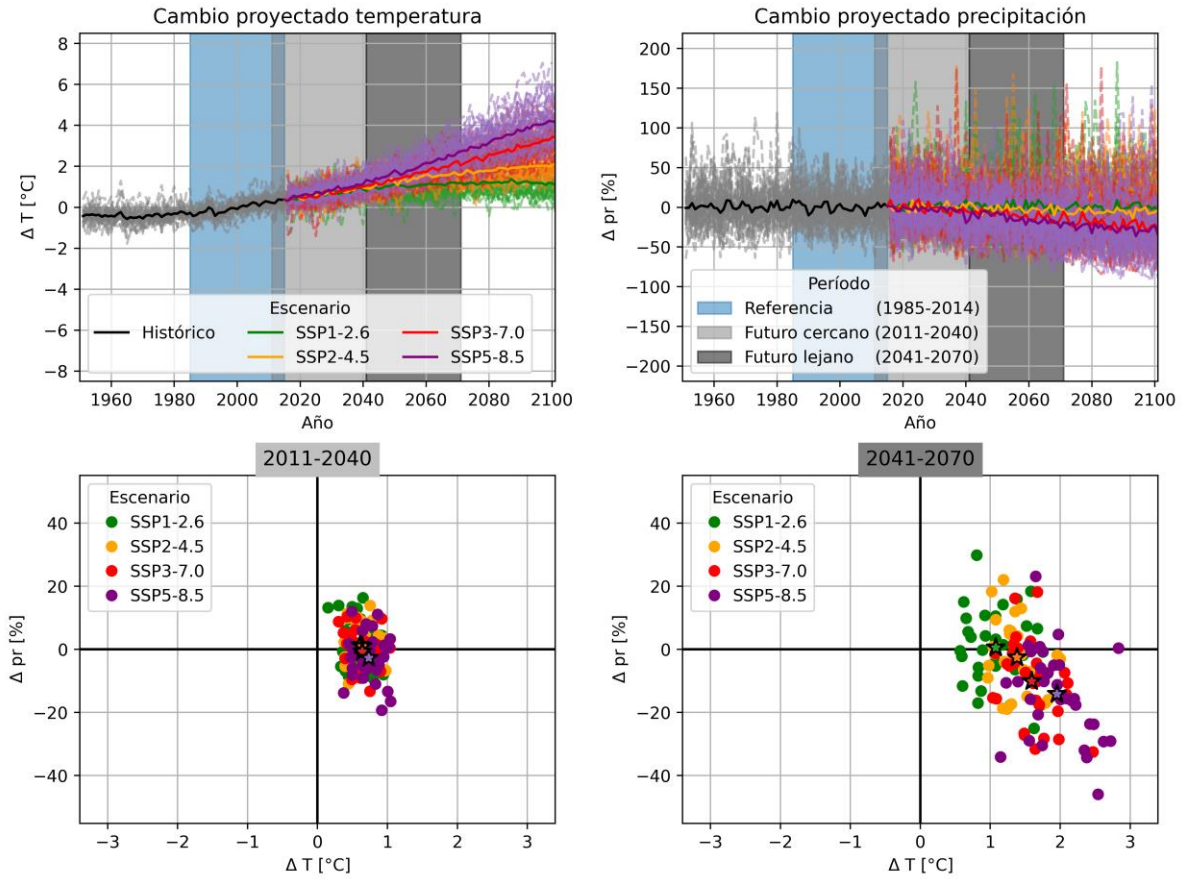


Figura 34. (arriba) Evolución de los cambios proyectados en la temperatura media anual y precipitación total anual para el Departamento del Atlántico y (abajo) relación entre cambios proyectados en temperatura y precipitación en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070. En todos los casos se tomó como referencia el período 1985-2014.
Nota 1: Las estrellas muestran el valor promedio de los modelos para un escenario en específico.
Nota 2: ΔT y Δpr corresponden a los cambios en los valores promedio de temperatura y precipitación anual, respectivamente.
Fuente: Elaboración propia.

Las proyecciones de cambio climático para el Departamento del Atlántico muestran un aumento constante en las temperaturas en todos los escenarios futuros e incertidumbre respecto a si habrá un aumento o disminución en las precipitaciones futuras. Adicionalmente, la incertidumbre de ambas variables aumenta a medida que se analiza en períodos más lejanos

En particular, se observa un aumento en las temperaturas respecto al período de referencia, con cambios promedio de 0.6 °C en el futuro cercano y entre 1.1 y 2.0 °C en el lejano. La desviación estándar entre los modelos es de entre 0.2 y 0.4 °C. Respecto a las precipitaciones, el escenario SSP1-2.6 muestra un aumento de 1.4 y 0.7% en el futuro cercano y lejano, respectivamente; el escenario SSP2-4.5 muestra un aumento de 1.0% y disminución de 2.5% en el futuro cercano y lejano, respectivamente. A diferencia de los escenarios anteriores, los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 indican una disminución constante en las precipitaciones. El escenario SSP3-7.0 muestra una disminución de 0.7 y 10.1% en el futuro cercano y lejano, respectivamente; y el escenario SSP5-8.5 muestra una disminución de 2.6 y 14.1% en el futuro cercano y lejano, respectivamente. La desviación estándar entre modelos es de entre 6 y 8% y entre 10 y 14% en el futuro cercano y lejano, respectivamente. En la Tabla 13 se presenta un desglose por escenario y período de los cambios proyectados en los futuros cercanos y lejano.

Tabla 13. Desglose de las proyecciones en temperatura y precipitación en los períodos 2011-2040y 2041-2070.

Período	Variable	Estadístico	SSP1-2.60	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
2011-2040	Precipitación (%)	Promedio	1.4	1.0	-0.7	-2.6
		Desviación Estándar	7.6	6.8	6.1	7.4
	Temperatura (°C)	Promedio	0.6	0.6	0.6	0.7
		Desviación Estándar	0.2	0.2	0.2	0.2
2041-2070	Precipitación (%)	Promedio	0.7	-2.5	-10.1	-14.1
		Desviación Estándar	12.2	10.7	12.7	14.4
	Temperatura (°C)	Promedio	1.1	1.4	1.6	2.0
		Desviación Estándar	0.4	0.3	0.3	0.4

Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar los impactos del cambio climático en recursos hídricos a escala de subcuenca se requiere de un análisis para determinar los modelos más representativos de las condiciones locales para evitar incorporar sesgos no deseados. Esta evaluación debe considerar la información más actualizada posible, siendo en este momento la presentada en el AR6 del IPCC que contiene los GCM más actualizados y con un período histórico más extenso, permitiendo un análisis de tendencias y proyecciones apropiada.

3.3.2.2. Escenario de clima futuro para la Evaluación Regional del Agua

Previo a definir los escenarios o condiciones a evaluar en un estudio, como, por ejemplo, la Evaluación Regional del Agua, se debe tener un objetivo claro. En este estudio, el objetivo del análisis de escenarios de cambio climático es evaluar una condición pesimista que sea consistente con el escenario más pesimista del AR6. Dado que solo se evaluará un único caso, se debe buscar el GCM que sea lo más representativo posible de las condiciones locales.

La información que entregan los GCM corresponde a una resolución mayor a 1° (mayor a 100 km), por lo que no debe esperarse que sea directamente representativa a escala local; sin embargo, estos modelos se pueden utilizar para comprender tendencias generales. Es por esto que, al momento de realizar una comparación con la información local para evaluar los modelos más representativos se consideran características generales, como, por ejemplo, la tendencia de los valores agregados anuales de precipitación y temperatura, además de una adecuada representación de la variación estacional de las precipitaciones.

Para evaluar cuantitativamente la representatividad de los GCM, se consideraron dos funciones objetivo. La primera función objetivo, denotada por F_{NSE}, busca cuantificar el ajuste de la estacionalidad de la precipitación de cada GCM a los datos observados mediante el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE por sus siglas en inglés). En este caso se considera la precipitación en términos de la fracción aportante al volumen total anual, es decir, los promedios mensuales divididos por la suma de los promedios mensuales. La segunda función objetivo, denotada por FO, relaciona la pendiente de la línea de tendencia de los valores anuales tanto de temperatura como de precipitación de cada GCM con las observaciones. Estas funciones se calculan de la siguiente forma:

$$F_{NSE} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{12}(GCM_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^{12}(O_t - \bar{O})^2}$$

$$FO = \sqrt{\left(1 - \frac{P_{GCM}}{P_{obs}}\right)^2 + \left(1 - \frac{T_{GCM}}{T_{obs}}\right)^2}$$

donde GCM_t y O_t son la fracción aportante del mes t a la precipitación anual del GCM analizado y de las observaciones, respectivamente; $\bar{O}$ es el promedio de los valores O_t; P_{GCM} y P_{obs} es la pendiente de la línea de tendencia de la precipitación total anual del GCM y de las observaciones, respectivamente, y T_{GCM} y T_{obs} es la pendiente de la línea de tendencia de la temperatura promedio anual del GCM y de las observaciones, respectivamente. Notar que valores $NSE = 1$ representan un ajuste perfecto y valores $NSE < 1$ indican un ajuste inferior. Por otro lado, valores $FO = 0$ representan un ajuste perfecto y valores $FO > 0$ indican un ajuste inferior.

Posterior al cálculo de las funciones objetivo, se filtran los GCM con $F_{NSE} > 0.7$, considerado un umbral que representa un buen ajuste entre variables (Moriasi et al., 2007). Los GCM filtrados se ordenan de forma ascendente en función de FO. La Figura 35 muestra la comparación de la estacionalidad de la precipitación, en términos de la fracción aportante al volumen anual, y la comparación de las pendientes de la línea de tendencias mencionadas. La Tabla 14 presenta un resumen de los valores relevantes y las funciones objetivos para el análisis de representatividad de los GCM.

Tabla 14. Funciones objetivo para el análisis de representatividad de los GCM.

GCM	Orden	F_{NSE}	$\frac{P_{GCM}}{P_{obs}}$	$\frac{T_{GCM}}{T_{obs}}$	FO
MPI-ESM1-2-HR	1	0.78	1.16	0.84	0.22
IITM-ESM	2	0.72	0.69	0.92	0.32
IPSL-CM6A-LR	3	0.91	0.60	1.18	0.44
KIOST-ESM	4	0.77	0.78	1.49	0.54
AWI-CM-1-1-MR	5	0.74	0.34	1.02	0.66
INM-CM5-0	6	0.72	0.25	1.09	0.76
FGOALS-f3-L	7	0.89	-0.07	1.39	1.14
BCC-CSM2-MR	8	0.79	-0.28	1.07	1.28

Fuente: Elaboración propia

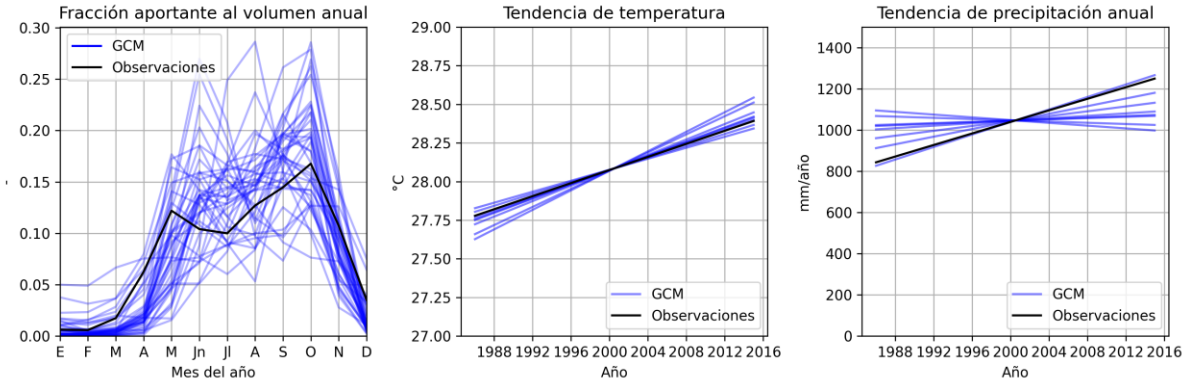


Figura 35. Comparación de la estacionalidad, pendiente de la línea de tendencia de la temperatura anual y pendiente de la línea de tendencia de la precipitación anual de los GCM y las observaciones.
Nota 1: La estacionalidad mensual se presenta normalizada por la suma de los promedios mensual del respectivo GCM u observación.
Nota 2: Las líneas de tendencias presentadas son referenciales. Se generó una línea para cada modelo que coincidiera con el promedio de los valores observados, pero con la pendiente real de la respectiva línea de tendencia.
Referencia: Elaboración propia.

La Figura 35 muestra una diversidad de condiciones. Respecto a la estacionalidad de la precipitación, algunos GCM presentan un comportamiento unimodal en lugar de un comportamiento bimodal, como ocurre en el Departamento del Atlántico. Respecto a las tendencias, en general todos los GCM aproximan la tendencia de las temperaturas en el Departamento; sin embargo, en el caso de las tendencias de las precipitaciones, no todos los GCM son consistentes con las condiciones en el Departamento, habiendo algunos casos que indican una disminución en el período 1985 – 2014 cuando lo que las observaciones indican es un aumento en términos de tendencia lineal (estos casos se pueden ver con valores negativos en la columna P_{GCM}/P_{obs} de la Tabla 14). La Tabla 14 muestra que hay 8 GCM con condición $F_{NSE} > 0.7$, con una variedad de condiciones respecto a las tendencias. Por ejemplo, para el caso del GCM MPI-ESM-1-2-HR, la pendiente de la tendencia lineal de la precipitación es un 16% mayor a la de las observaciones y en la temperatura la pendiente es 16% menor a la de las observaciones. Por otro lado, para el caso del modelo BCC-CSM2-MR, la pendiente de la tendencia lineal de la precipitación va en sentido opuesto a la pendiente de las observaciones y la pendiente de la temperatura es 7% mayor que las observaciones.

En base a esta información, se compararon las proyecciones de los GCM que mejor ajusten a las condiciones locales, en términos de las funciones objetivo, con las proyecciones promedio del escenario de interés. En particular, para la Evaluación Regional del Agua se buscó el escenario más pesimista, correspondiente al SSP5-8.5. La Figura 36 muestra un resumen de la comparación de la pendiente de la tendencia lineal tanto de precipitación y temperatura y la comparación de los cambios proyectados en temperatura y precipitación de los GCM y promedio del escenario para los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1985-2014.

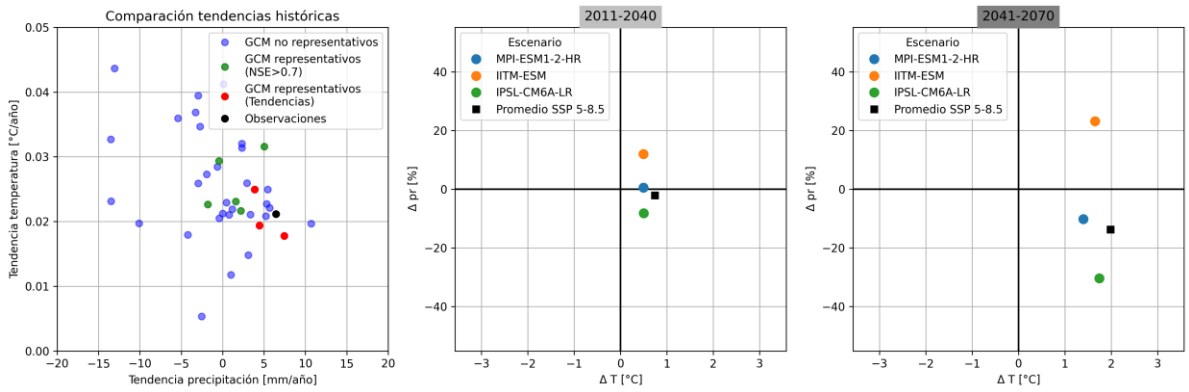


Figura 36. a) Comparación general de los GCM respecto a las observaciones, b y c) comparación de las proyecciones de los 3 GCM con mejor representatividad de las condiciones locales con las proyecciones promedio del escenario SSP5-8.5 en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respectivamente, respecto al período 1985-2014.

Fuente: Elaboración propia.

La comparación de las tendencias históricas muestra que, si bien hay varios GCM que representan bien las tendencias de las observaciones, estos no logran representar la variación estacional de las precipitaciones $F_{NSE} \leq 0.7$, clasificándolos como GCMs no representativos. Por otro lado, de los GCM clasificados como representativos, hay varios que no logran representar bien las tendencias de las observaciones e incluso en algunos casos representan tendencias opuestas. Finalmente, se definió el GCM MPI-ESM1-2-HR para el análisis de la Evaluación Regional del agua debido a que cumple con las siguientes condiciones: 1) estar dentro de los modelos que mejor representan la estacionalidad de la precipitación observada (puntos verdes en Figura 36 a)), 2) estar dentro de los modelos con mejor representación de las tendencias de las observaciones (puntos rojos en Figura 36 a)) y 3) representar las condiciones promedio de los GCM en el escenario SSP5-5.8 en términos de cambio tanto en precipitación como temperatura.

Si bien la información histórica de los GCM finaliza el año 2014, al comparar los cambios en precipitación y temperatura entre los períodos 1993-2022 (últimos 30 años) y 1985-2014 para las observaciones y para el modelo MPI-ESM1-2-HR, se obtiene lo siguiente: 1) para las precipitaciones, el modelo MPI-ESM1-2-HR indica un aumento en un 1.9% y las observaciones un aumento en un 4% y 2) para las temperaturas tanto el modelo MPI-ESM1-2-HR como las observaciones indican un aumento en 0.1 °C. Esto complementa que la información del modelo MPI-ESM1-2-HR en el período 1985 – 2022 es consistente con las observaciones.

Finalmente, las proyecciones climáticas del modelo MPI-ESM1-2-HR bajo el escenario SSP5-8.5, respecto al período 1985-2014, en el período 2011-2040 indican un aumento en temperaturas de 0.5 °C y aumento de la precipitación en un 0.5% y en el período 2041-2070 indican un aumento en temperaturas de 1.4 °C y disminución de la precipitación en un 10%. Respecto al período 1993-2022, en el período 2011-2040 indican un aumento en temperaturas de 0.4 °C y una disminución de la precipitación en un 1.3% y en el período 2041-2070 indican un aumento en temperaturas de 1.3 °C y disminución de la precipitación en un 11.9%.

4. Calidad de aguas

La caracterización de la calidad de agua se realizó a partir de la información suministrada por tres instituciones: CRA, IDEAM y Cormagdalena. En una base de datos en Excel se consolidaron las muestras de calidad de agua de las tres entidades, verificando la ubicación de cada estación,

unificando las unidades de medición, y excluyendo datos o mediciones anómalas. Los puntos de monitoreo se unificaron de acuerdo con su cercanía. Como resultados se obtuvieron 32 estaciones de calidad de agua en cuerpos lénticos y lóticos tal como se presenta en la Figura 37. La base de datos cuenta con información desde el año 2000 hasta el año 2022.

Inicialmente se identificaron 267 puntos de medición que se consolidaron en 32 estaciones de calidad de agua, donde se han medido 789 parámetros, entre fisicoquímicos, bacteriológicos e hidrobiológicos. Un total de 31,018 registros se consolidaron en la base de datos para determinar los indicadores de calidad de agua tanto fisicoquímicos como hidrobiológicos.

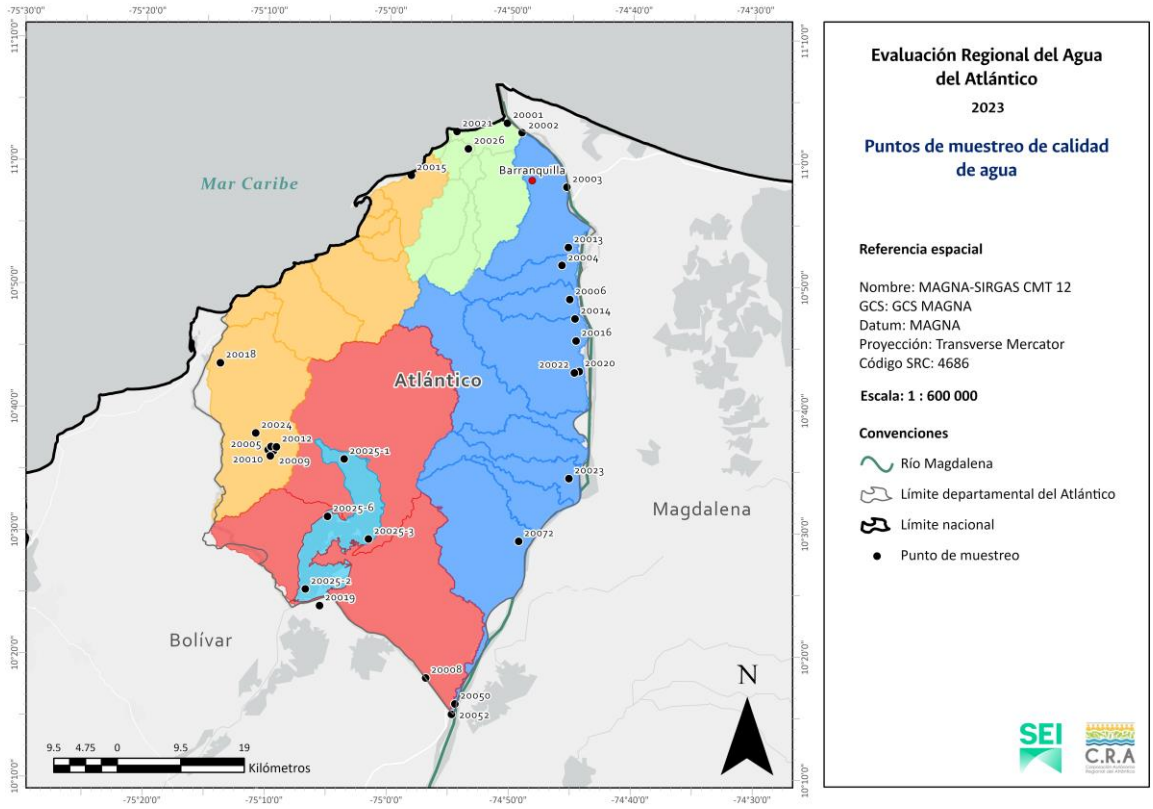


Figura 37. Estaciones de calidad de agua consolidadas en la base de datos de calidad de agua en la jurisdicción CRA. Fuente: Elaboración propia.

5. Usos de agua – Demanda

La caracterización de la demanda o requerimientos de agua en el Departamento del Atlántico se realizó a partir de la base de datos *"RURH – Concesiones.xlsx"* provista por la CRA. Con esta información se determinó el caudal concesionado total para cada una de las 26 subcuencas delimitadas y presentadas en la sección 3.1.6. En esta sección se describe el procesamiento de la información de concesiones y se divide la información según usos del agua y fuentes de abastecimiento. Adicionalmente, se propone una estimación de los usos del agua en el Departamento del Atlántico enfocada en capturar potenciales usos y posibles usuarios no reglamentados.

5.1. Procesamiento de la información histórica concesionada

En esta sección se presenta el procedimiento y consideraciones que se tuvieron al ordenar la información de concesiones entregada por la CRA, además del procedimiento para complementar la información de caudales faltantes.

5.1.1. Revisión y análisis inicial de la información

La base de datos de concesiones contiene información de un total de 479 concesiones otorgadas, de las cuales 443 corresponden a persona jurídica privada y 36 a persona natural, representando un 92.5 y 7.5% de la información total, respectivamente. Con el objetivo de representar de la mejor manera las captaciones de agua reglamentadas por la CRA dentro del área de estudio, se consideró lo siguiente:

- Se descartaron del análisis aquellas concesiones que carecían de coordenadas del punto de captación, no tenían un valor de caudal asignado o tenían clasificación de fuente de captación como reuso o aguas lluvia. De este análisis se descartaron 12 concesiones (2.5% de la información)
- Se descartaron aquellas concesiones duplicadas y correspondientes a renovaciones o modificaciones, manteniendo únicamente la última concesión vigente. Para este análisis se revisó el número de resolución de las concesiones que se sospechaba correspondían a una renovación o modificación[10]. De este análisis se descartaron 42 concesiones (8.8% de la información)

Adicionalmente, dentro de los talleres de validación de la información recopilada y procesada para su implementación en el modelo de recursos hídricos desarrollado en este estudio y de validación previa de resultados de los indicadores ERA, se descartaron las siguientes concesiones:

- Tres concesiones de aguas subterráneas de 221 l/s cada una otorgadas en el municipio de Sabanalarga. Esto, debido a que no se realizaron pruebas de bombeo sobre la misma, ni se le ha hecho seguimiento desde 2015.
- Dos concesiones otorgadas en el Lago el Cisne, considerando que actualmente ya no hay extracción de agua de esta fuente.

A partir de estas consideraciones y conversaciones con la CRA, se descartaron en total 59 concesiones (12.3% de la información), obteniendo un total de 420 concesiones reglamentadas y validadas por la CRA para su inclusión en el modelo de recursos hídricos.

Es importante mencionar que en este estudio no se consideraron las concesiones otorgadas dentro del casco urbano de Barranquilla, las cuales maneja Barranquilla verde. Únicamente se consideraron las concesiones reglamentadas por la CRA.

[10] La revisión se realizó en el siguiente enlace: https://www.crautonoma.gov.co/atencion-al-publico/transparencia-y-acceso-a-informacion-publica/normatividad/resoluciones.

5.1.2. Asignación del caudal faltante según usos

Para determinar el caudal faltante según el uso de las 420 concesiones consideradas en este estudio, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se verificó que el caudal total otorgado fuera igual a la suma del caudal asignado para las categorías Abastecimiento y Consumo Humano, Por Abrevaderos, Pesca, Riego y Silvicultura y Otros.
2. En caso de que no se existieran valores por uso:
   a. Si existía un valor para un único uso, se consideró este como su valor total o se verificó la razón social que solicitaba la concesión para determinar su uso.
   b. Si había dos usos y solo uno tenía un valor, se consideró el faltante como la diferencia entre el caudal total otorgado y el valor existente del otro uso.
3. Para dos o más usos que no tenían un valor de caudal establecido, se establecieron módulos de consumo para cada categoría. Estos valores se obtuvieron de resoluciones de CRA y Cormagdalena y se presentan en la Tabla 15. En la mayoría de los casos se calculó solo un uso (abastecimiento) y el siguiente se consideraba como la diferencia con el caudal total.

Tabla 15. Módulos de consumo para concesiones CRA.

Uso	Clasificación	Módulo de Consumo
Abastecimiento y consumo humano	Número personas permanentes	150 l/hab-día
	Número personas transitorias	50 l/hab-día
Pecuario	Bovino	60 l/cabeza-día
	Aves	0.1 l/cabeza-día
Riego	Riego	0.8 l/s-Ha

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

Una vez asignado y verificado el valor de caudal en las 420 concesiones, se establecieron los siguientes usos de agua dentro del Departamento del Atlántico:

- Doméstico municipal: Abastecimiento de acueductos municipales
- Doméstico rural: Abastecimiento de acueductos rurales, fincas, empresas u otros usuarios
- Pecuario: Concesiones en categoría de Por Abrevaderos
- Agrícola: Concesiones en categoría Riego y Silvicultura
- Pesca: Concesiones en categoría Pesca
- Estético: Concesiones otorgadas para riego de jardines y canchas (En base a columna Descripción de categoría otros de la base de datos de concesiones)
- Industrial: Concesiones otorgadas para uso industrial (En base a columna Descripción de categoría otros de la base de datos de concesiones)
- Otro: Usos para Minería, Lavado de autos, Redes contra incendio, entre otros (En base a columna Descripción de categoría otros de la base de datos de concesiones)

Con el objetivo de que la información sea compatible con el análisis de indicadores de la ERA para el Departamento del Atlántico, la información se dividió en dos categorías:

- Concesiones de agua asociadas a las fuentes superficiales principales de abastecimiento del Departamento, es decir, río Magdalena, canal del Dique y embalse el Guájaro.

- Concesiones asociadas a otras fuentes de agua dentro de los límites de cada subcuenca. Esto para evaluar el estado del recurso hídrico en el Departamento a partir de la escorrentía superficial y subterránea generada dentro de las subcuencas y sin tener en cuenta las fuentes principales.

En el archivo *"BD_Demandas_CRA.xlsx"* que acompaña a este informe, se encuentran las concesiones organizadas según el procedimiento descrito en las secciones 5.1.1 y 5.1.2.

5.2. Concesiones de agua en el río Magdalena, canal del Dique y embalse el Guájaro

El río Magdalena, el canal del Dique y el embalse el Guájaro son las tres fuentes principales de abastecimiento para los diferentes usos en el Departamento del Atlántico. El caudal total concesionado en estas 3 fuentes es de 71,595 l/s (71.6 m^3/s). Este valor concesionado no tiene en cuenta los 4,000,000 l/s otorgados en una concesión de uso de pesca de jaulas dentro del embalse El Guájaro. La Tabla 16 presenta los valores de caudal concesionado para cada fuente según los usos establecidos en la sección anterior. En el río Magdalena se han otorgado 59,818.1 l/s, en el embalse El Guájaro 11,326.5 l/s y en el Canal del Dique 450.8 l/s, correspondientes a un 83, 16 y 1% del total, respectivamente.

Tabla 16. Concesiones de Agua en el río Magdalena, embalse El Guájaro y canal del Dique.

Uso	Río Magdalena [l/s]	Canal del Dique [l/s]	Embalse El Guájaro [l/s]	Total [l/s]
Doméstico municipal	13,942.0	0.0	0.0	13,942.0
Doméstico rural	989.9	394.0	49.1	1,433.0
Pecuario	4.0	0.0	0.0	4.0
Pesca	14.2	56.5	971.0	1,041.7
Estético	191.5	0.0	63.0	254.5
Agrícola	11,382.6	0.0	10,129.5	21,512.1
Industrial	2,937.5	0.0	76.3	3,013.8
Otro	30,356.4	0.2	37.7	30,394.4
Total	59,818.1	450.8	11,326.5	71,595.4

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

5.2.1. Concesiones de agua en el río Magdalena

A partir de lo presentado en la Tabla 16, el uso que mayor presión ejerce sobre el río Magdalena es la categoría otro. Esto debido a que existe una concesión de 29,723.9 l/s otorgada a TERMOBARRANQUILLA S.A. E.S.P. para enfriamiento y refrigeración de equipos. Sin tener en cuenta esta concesión, el uso doméstico municipal, con 13,942 l/s, es el que mayor presión ejerce sobre el río Magdalena, considerando el abastecimiento a la ciudad de Barranquilla y a los diferentes municipios que se encuentran cercanos al río. El sector agrícola también tiene una presión importante sobre el río Magdalena con 11,382.6 l/s, seguido del sector industrial con 2,937.5 l/s. Finalmente, el sector pecuario es el que menor presión ejerce sobre el recurso con solo 4.0 l/s.

5.2.2. Concesiones de agua en el embalse El Guájaro

Las principales actividades que ejercen presión sobre el embalse El Guájaro son el sector agrícola con 10,129.5 l/s y la pesca con 971.0 l/s. Los demás usos ejercen una presión menor a 100 l/s.

5.2.3. Concesiones de agua en el canal del Dique

El desde el Canal del Dique se usa principalmente para el uso doméstico en áreas rurales, con 394 l/s. El caudal restante captado y reglamentado se usa para la pesca y otros 56.5 y 0.2 l/s, respectivamente.

5.3. Concesiones de agua en otras fuentes diferentes al río Magdalena, embalse El Guájaro y canal del Dique

A partir del registro de concesiones de la CRA, se estimó el valor acumulado de las concesiones otorgadas en otras fuentes diferentes al río Magdalena, embalse El Guájaro y canal del Dique, dentro del Departamento del Atlántico, para cada una de las 26 subcuencas definidas en la sección 3.1.6.

Para determinar a qué subcuenca pertenece cada punto de captación, se proyectaron de manera espacial las coordenadas de captación de cada concesión en ArcGIS Pro y se realizó una Unión Espacial (herramienta “Spatial Join”) con la capa de subcuencas (ver Figura 38).

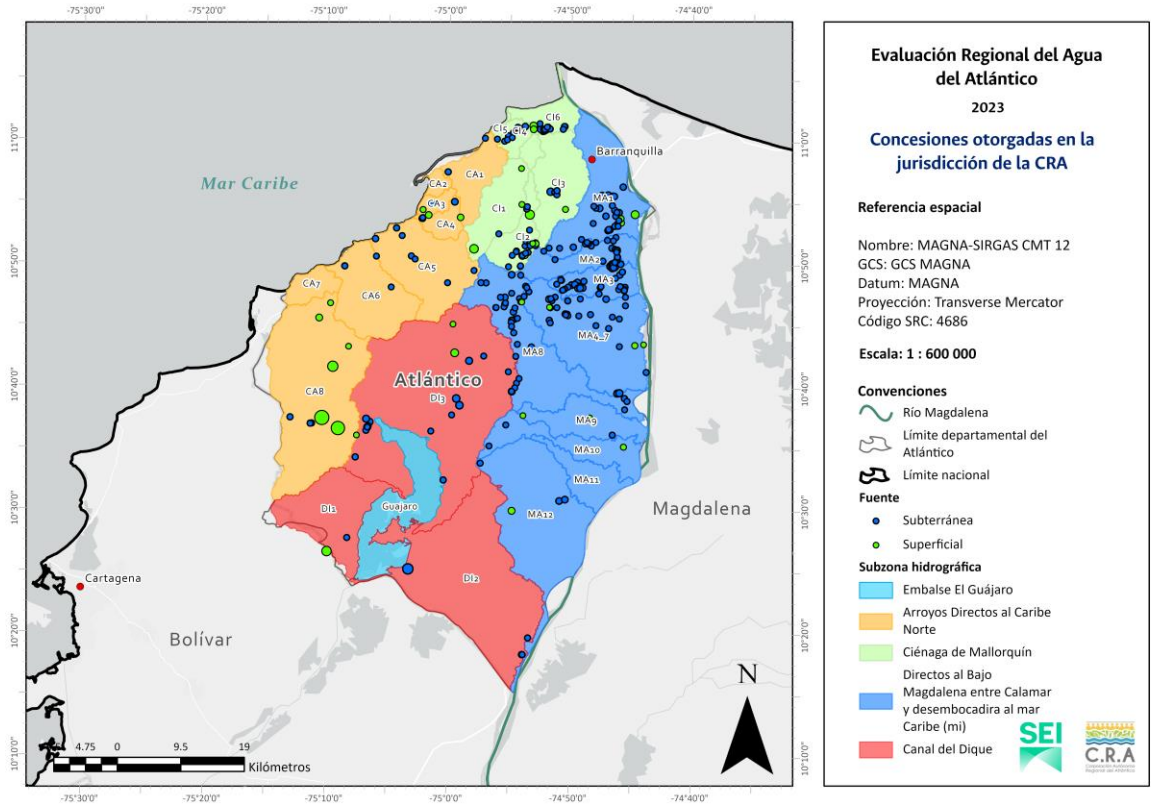


Figura 38. Distribución espacial de las concesiones otorgadas por la CRA.
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

Evaluando las concesiones otorgadas para estas fuentes, se ha otorgado un total de 1,670.9 l/s de los cuales 1,094.4 l/s corresponden a fuentes subterráneas y 576.5 l/s a fuentes superficiales, correspondiente a un 65 y 35% del total. La Figura 39 muestra la distribución de estas concesiones en cada una de las subzonas hidrográficas.

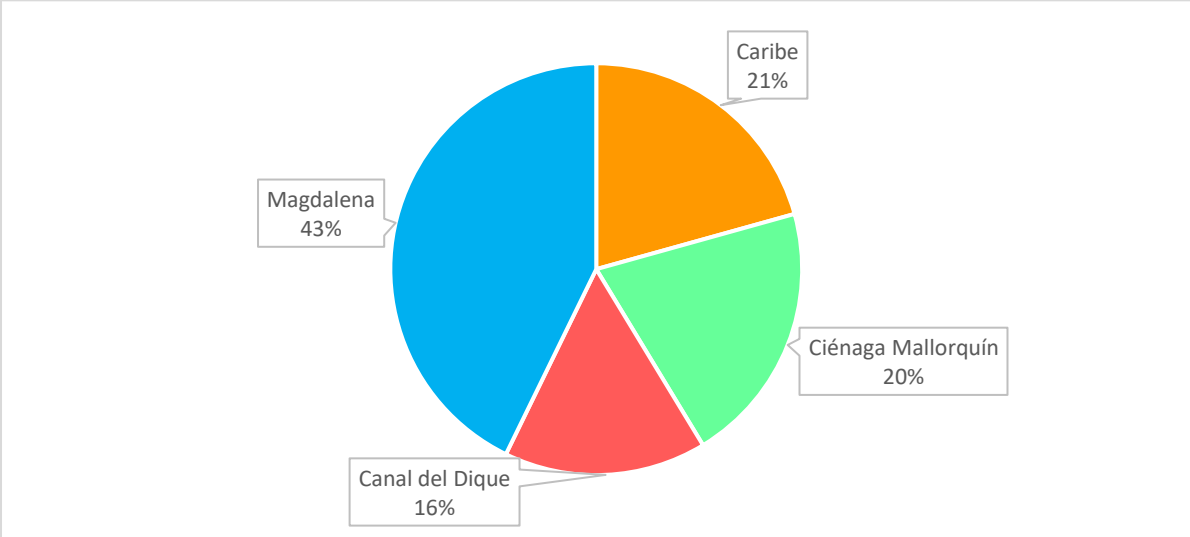


Figura 39. Distribución del caudal concesionado en otras fuentes en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico.

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

La subzona hidrográfica donde hay mayor presión sobre el recurso hídrico en el Departamento del Atlántico es la subzona Magdalena con 714.6 l/s, seguida de la subzona Caribe con 345.5 l/s y Mallorquín con 344.9 l/s. La subzona que menor presión ejerce sobre el recurso hídrico es la del canal del Dique con 265.9 l/s.

Al comparar las concesiones otorgadas por uso para otras fuentes, presentadas en la Tabla 17 y Figura 40, se observa que el sector agrícola es el que mayor presión ejerce en el Departamento del Atlántico con 415.3 l/s, seguido del uso Industrial con 318.0 l/s, correspondientes a un 25 y 19% del total de otras fuentes, respectivamente. El sector pecuario tiene concesionados 247.8 l/s, mientras que el uso estético 214.7 l/s y otro 209.7, correspondientes a un 15, 13 y 13% del total del uso abastecido de otras fuentes. El uso doméstico total abarca solo un 10% de la presión sobre el recurso distribuido en 68.8 y 105.3 l/s para municipal y rural, respectivamente. Finalmente, para la pesca se han otorgado 91.3 l/s, que corresponde a un 5% del total.

Tabla 17. Caudal Concesionado por Tipo de Uso para Otras Fuentes

Uso	Caudal Concesionado [l/s]
Doméstico municipal	68.8
Doméstico rural	105.3
Pecuario	247.8
Pesca	91.3
Estético	214.7
Agrícola	415.3
Industrial	318.0
Otro	209.7
Total	1,670.9

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

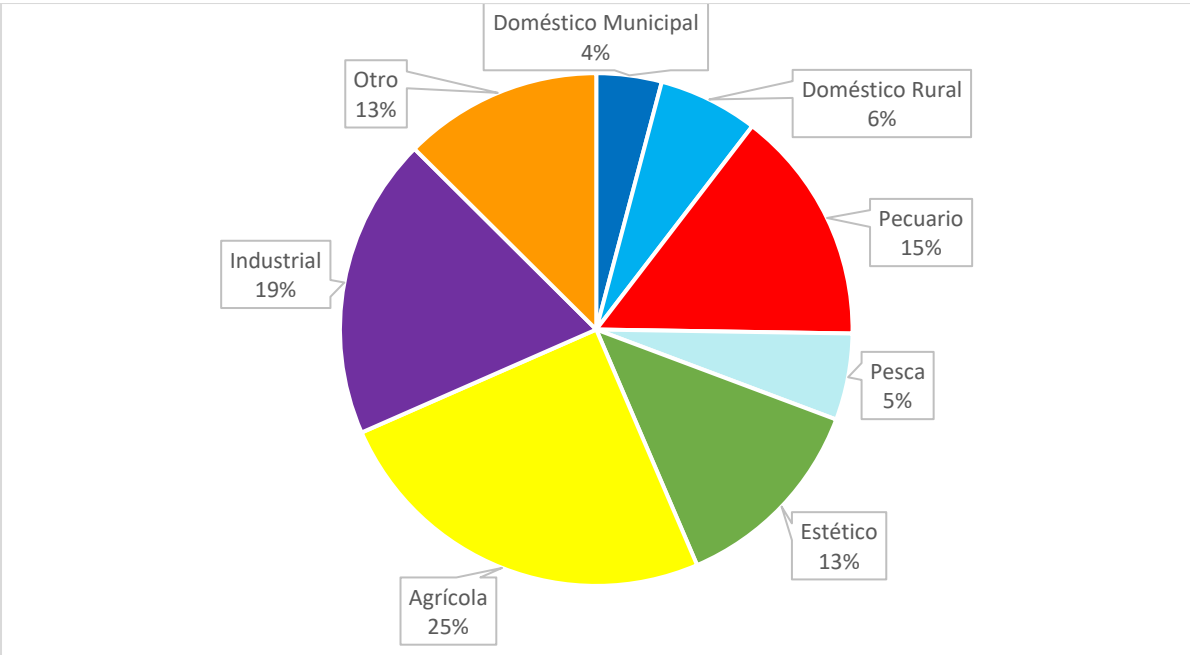


Figura 40. Distribución del caudal concesionado desde otras fuentes por tipo de uso.
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

5.3.1. Fuentes superficiales

La Figura 41 presenta el porcentaje de presión que ejerce cada tipo de uso sobre fuentes superficiales en el Atlántico según las concesiones otorgadas. De los 576.5 l/s otorgados en fuentes superficiales, la mayor presión la ejerce el sector agrícola con 244.4 l/s, seguido del uso pecuario con 105.0 l/s y el domestico rural con 90.3 l/s, correspondientes a un 42, 18 y 16% del total. Los demás usos tienen valores concesionados menores a 50 l/s.

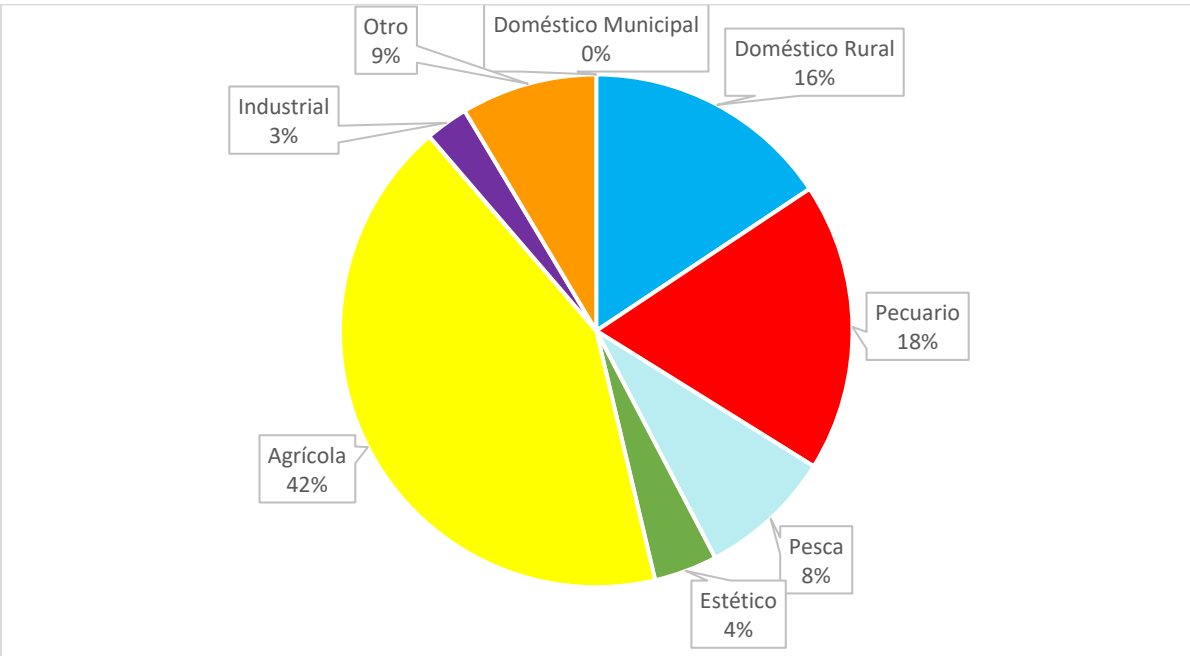


Figura 41. Caudal concesionado por tipo de uso desde fuentes superficiales.
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

Las subcuencas de la subzona Caribe son las que tienen mayor presión sobre las fuentes superficiales con 286.7 l/s, seguido de las subcuencas de la subzona Mallorquín con 153.57 l/s. Las subcuencas de la subzona Canal del Dique cuentan con caudal de 71.15 l/s y las de la subzona Magdalena cuentan con 65.03 l/s. Las proporciones del caudal concesionado en fuentes superficiales por cada una de las subzonas hidrográficas se presentan en la Figura 42.

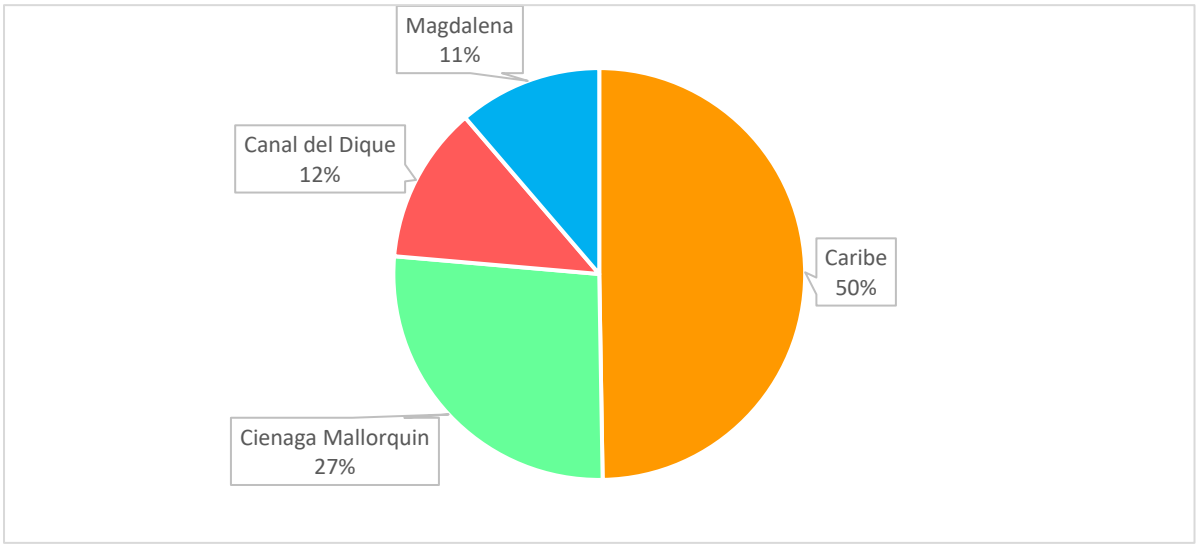
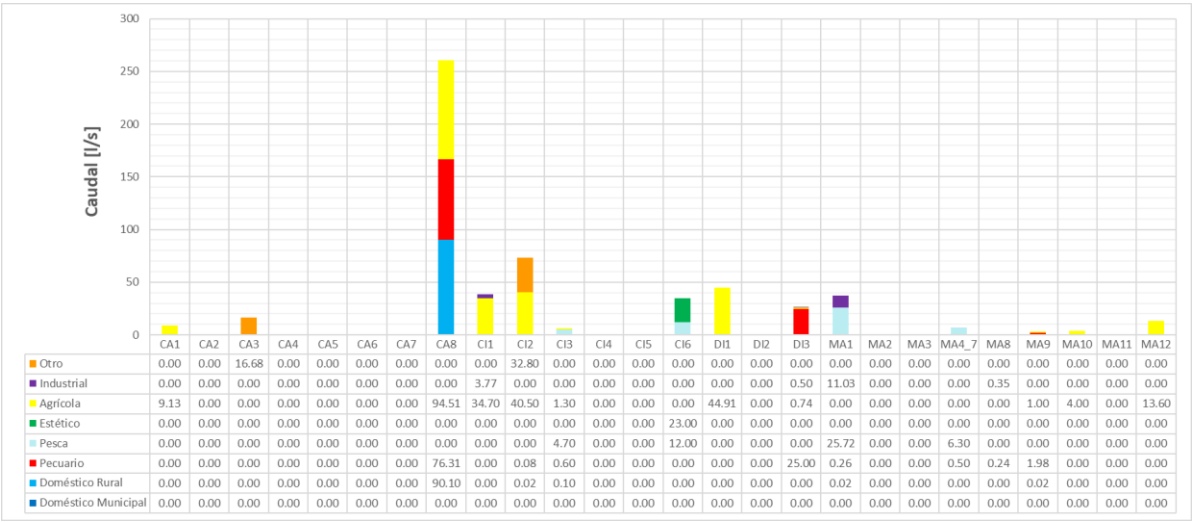


Figura 42. Presión sobre fuentes superficiales a nivel de subzona hidrográfica.
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

Para analizar la presión que se ejerce sobre las fuentes superficiales en cada subcuenca, la Figura 43 muestra mediante un gráfico de columnas apiladas el caudal total que se ha concesionado por cada subcuenca, donde cada color representa un tipo de uso. Allí, se muestra que la subcuenca CA8 – Ciénaga del Totumo, en la subzona Caribe, es la que mayor presión ejerce en el Departamento del Atlántico con 260.9 l/s, distribuidos en uso agrícola, domestico rural y pecuario. A esta le sigue la subcuenca CI2 – Oriental Pan de Azúcar en la subzona Mallorquín con 73.4 l/s en uso agrícola y otros.



	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5	CA6	CA7	CA8	CI1	CI2	CI3	CI4	CI5	CI6	DI1	DI2	DI3	MA1	MA2	MA3	MA4_7	MA8	MA9	MA10	MA11	MA12
Otro	0.00	0.00	16.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Industrial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	11.03	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
Agrícola	9.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	94.51	34.70	40.50	1.30	0.00	0.00	0.00	44.91	0.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	4.00	0.00	13.60
Estético	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pesca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.70	0.00	0.00	12.00	0.00	0.00	0.00	25.72	0.00	0.00	6.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pecuario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	76.31	0.00	0.08	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	0.26	0.00	0.00	0.50	0.24	1.98	0.00	0.00	0.00
Doméstico Rural	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.10	0.00	0.02	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Doméstico Municipal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 43. Caudal concesionado por uso en fuentes superficiales para cada subcuenca.
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

En las siguientes subcuencas no se han otorgado concesiones en fuentes superficiales:

- Subzona Caribe:
  - CA2 – Arroyo Trébol
  - CA4 – Arroyo Caja
  - CA5 – Arroyo Juan de Acosta
  - CA6 – Arroyo Cascabel
  - CA7 – Galerazamba
- Subzona Mallorquín:
  - CI4 – Cisne
  - CI5 – Perdida Cantera
- Subzona canal del Dique:
  - DI2 – Oriental Embalse El Guájaro
- Subzona Magdalena
  - MA2 – Ciénaga de Malambo
  - MA3 – Ciénaga El Convento
  - MA11 – Ciénaga Uvero 2

5.3.2. Fuentes subterráneas

El agua subterránea es una fuente vital para el abastecimiento a los diferentes usuarios en el Departamento del Atlántico. Esto se ve reflejado en que el 65% de la demanda en el Departamento hace uso de esta fuente (1,094.4 l/s), sin considerar el río Magdalena, embalse El Guájaro y canal del Dique. La Figura 44 muestra cómo se distribuyen los usos de agua que se abastecen de aguas subterráneas.

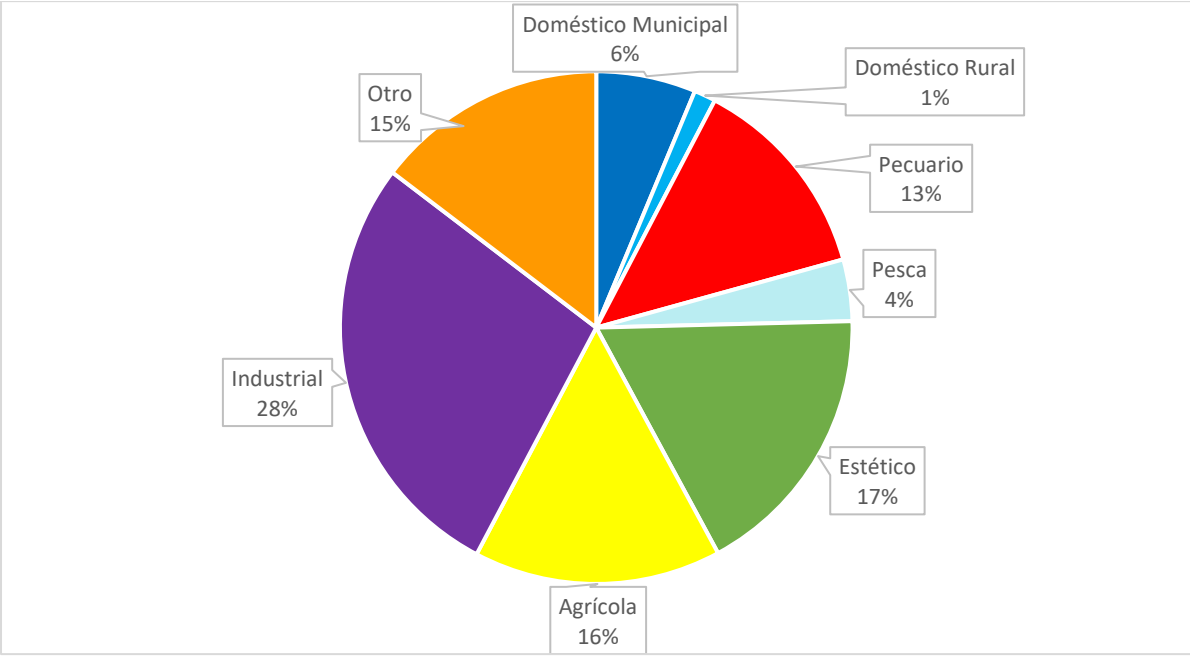


Figura 44. Caudal concesionado por tipo de uso de fuentes subterráneas.
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

El uso que mayor presión ejerce sobre las fuentes subterráneas, a diferencia de las fuentes superficiales, es el industrial con 302.3 l/s, correspondiente a un 28% del total, seguido de los usos estético, agrícola, otro (minería, redes contra incendio, riego de vías) y pecuario con una presión entre 100 y 200 l/s cada uno, cubriendo entre 13 y 17% del total cada uno. El uso para abastecimiento domestico usa 84 l/s y la pesca 42.5 l/s, correspondiente a un 7 y 4% del total.

Respecto a la presión por subzonas hidrográficas, la distribución para las fuentes subterráneas es contraria a la de las fuentes superficiales. La Figura 45 muestra el porcentaje de presión que se ejerce sobre las fuentes subterráneas de cada subzona. La subzona Magdalena es donde hay mayor demanda del recurso con 649.6 l/s concesionados y la subzona Caribe es en la que menor presión se ejerce, con 58.7 l/s concesionados, correspondientes a un 59 y 5% del total, respectivamente. Las subzonas Canal del Dique y Mallorquín tienen una presión sobre las fuentes subterráneas con 194.8 y 191.4 l/s respectivamente, correspondientes al 18 y 17% de la presión total sobre estas fuentes en el Departamento.

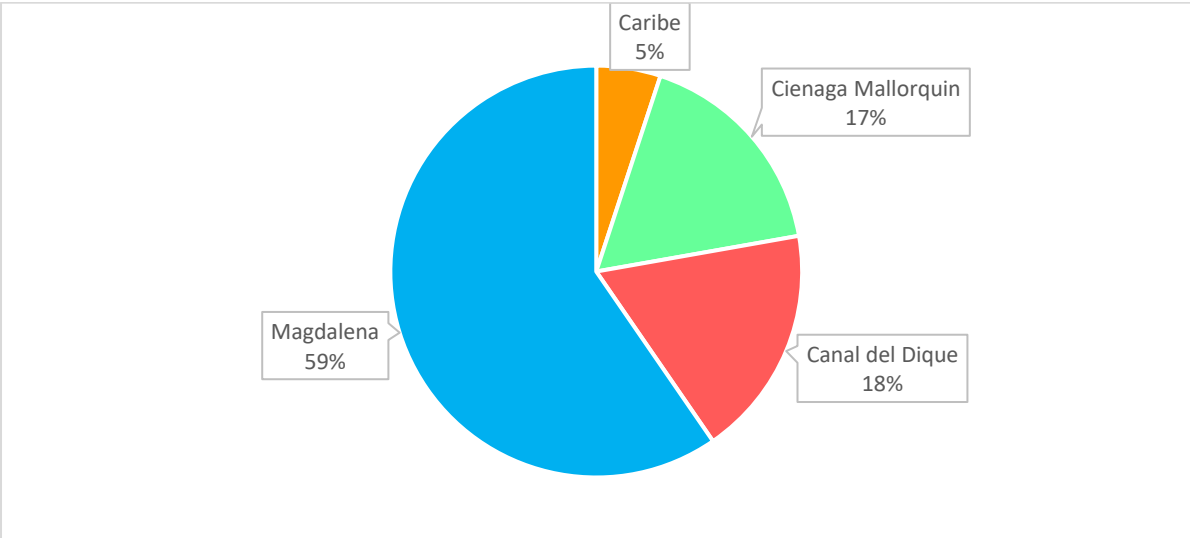
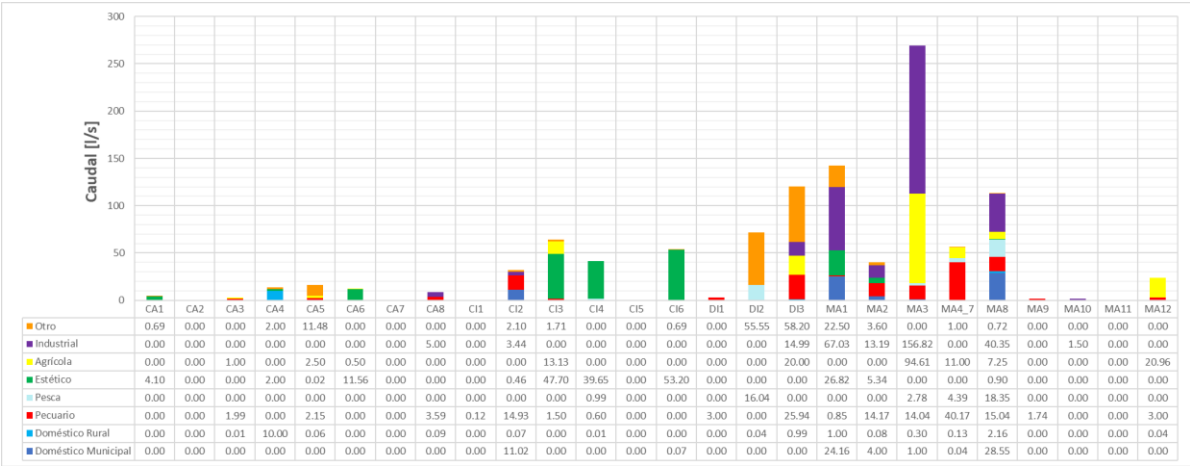


Figura 45. Presión sobre fuentes subterráneas a nivel de subzona hidrográfica.
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

Respecto a la presión sobre fuentes subterráneas, la Figura 46 presenta mediante un gráfico de barras apilado el caudal total concesionado por tipo de uso para cada una de las 26 subcuencas delimitadas en el Departamento del Atlántico. La subcuenca MA3 – Ciénaga El Convento es la que mayor presión ejerce sobre fuentes subterráneas. Esta subcuenca tiene un caudal otorgado a fuentes subterráneas de 269.6 l/s destinados a uso industrial principalmente, y una parte también para uso agrícola. Discutiendo los resultados con la CRA se evidenció que dentro de esta subcuenca se encuentran ubicadas muchas industrias.



	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5	CA6	CA7	CA8	CI1	CI2	CI3	CI4	CI5	CI6	DI1	DI2	DI3	MA1	MA2	MA3	MA4_7	MA8	MA9	MA10	MA11	MA12
Otro	0.69	0.00	0.00	2.00	11.48	0.00	0.00	0.00	0.00	2.10	1.71	0.00	0.00	0.69	0.00	55.55	58.20	22.50	3.60	0.00	1.00	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00
Industrial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	0.00	3.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.99	67.03	13.19	156.82	0.00	40.35	0.00	1.50	0.00	0.00
Agrícola	0.00	0.00	1.00	0.00	2.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	13.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00	0.00	0.00	94.61	11.00	7.25	0.00	0.00	0.00	20.96
Estético	4.10	0.00	0.00	2.00	0.02	11.56	0.00	0.00	0.00	0.46	47.70	39.65	0.00	53.20	0.00	0.00	0.00	26.82	5.34	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00
Pesca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	16.04	0.00	0.00	0.00	2.78	4.39	18.35	0.00	0.00	0.00	0.00
Pecuario	0.00	0.00	1.99	0.00	2.15	0.00	0.00	3.59	0.12	14.93	1.50	0.60	0.00	0.00	3.00	0.00	25.94	0.85	14.17	14.04	40.17	15.04	1.74	0.00	0.00	3.00
Doméstico Rural	0.00	0.00	0.01	10.00	0.06	0.00	0.00	0.09	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.99	1.00	0.08	0.30	0.13	2.16	0.00	0.00	0.00	0.04
Doméstico Municipal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.02	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	24.16	4.00	1.00	0.04	28.55	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 46. Caudal concesionado por uso en fuentes subterráneas para cada subcuenca.
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de concesiones CRA.

En las siguientes subcuencas no se ha otorgado ninguna concesión en fuentes subterráneas:

- Subzona Caribe:
  - CA2 – Arroyo Trébol
  - CA7 – Galerazamba
- Subzona Mallorquín:
  - CI5 – Perdida Cantera
- Subzona Magdalena
  - MA11 – Ciénaga Uvero 2

En base a la base de datos compartida por la CRA, estas cuatro subcuencas a las que no se les ha otorgado ninguna concesión de agua subterránea tampoco se le han otorgado concesiones de agua superficial.

5.4. Proyecciones de usos de agua – Demanda potencial

Con el objetivo de cuantificar el agua utilizada en actividades que usualmente no tienen concesión de agua reglamentada, como lo son la agricultura, la ganadería o conexiones domesticas ilegales, se proyectó la demanda de agua estimada por medio de módulos de consumo e información secundaria asociada a usos del suelo y actividades productivas. Para efectos de este estudio, a esta proyección y análisis se le denominó Demanda Potencial del agua. A continuación, se presenta la estimación de la demanda potencial de agua según su uso.

5.4.1. Demanda potencial de agua para uso doméstico

Para estimar la demanda actual y futura de agua por parte de la población en el Departamento del Atlántico es esencial primero caracterizarla. Para este fin, se utilizó la información del Censo nacional de población y vivienda (DANE, 2018) que abarca tanto áreas urbanas como rurales de los municipios dentro del Departamento (Figura 47). Este censo proporciona proyecciones de población municipal y rural desde 2018 hasta 2035. Con el fin de proyectar la población para el año 2040, año de interés según los escenarios a analizar en este estudio (ver sección 6), se aplicó el método exponencial basado en las tasas de crecimiento estimadas por el DANE. La Figura 48 ilustra la proyección de la población

para 2020, obtenida del DANE (2018), y para 2040, estimada mediante el método exponencial, tomando como referencia la tasa de crecimiento 2034 – 2035. Esta figura diferencia entre las cabeceras municipales como los centros poblados y zonas rurales dispersas de los municipios. Para una mejor representación visual, el eje vertical se presenta en escala logarítmica, y los valores reales de población se muestran sobre cada barra.

Censo Nacional de Población y Vivienda (DANE, 2018)	Proyección de población por municipio hasta 2035 (DANE, 2018)	Proyeccion de la poblacion por muncipio 2035 - 2040 (estimado en este estudio)
•Población por Municipio del Departamento del Atlántico en el sector urbano y rural	•Cabecera municipal •Centros poblados y rural disperso	•Crecimiento a partir de proyeccion poblacional municipal con el método exponencial

Figura 47. Línea base para representar la población actual y futura en el Departamento del Atlántico.
Fuente: Elaboración propia.

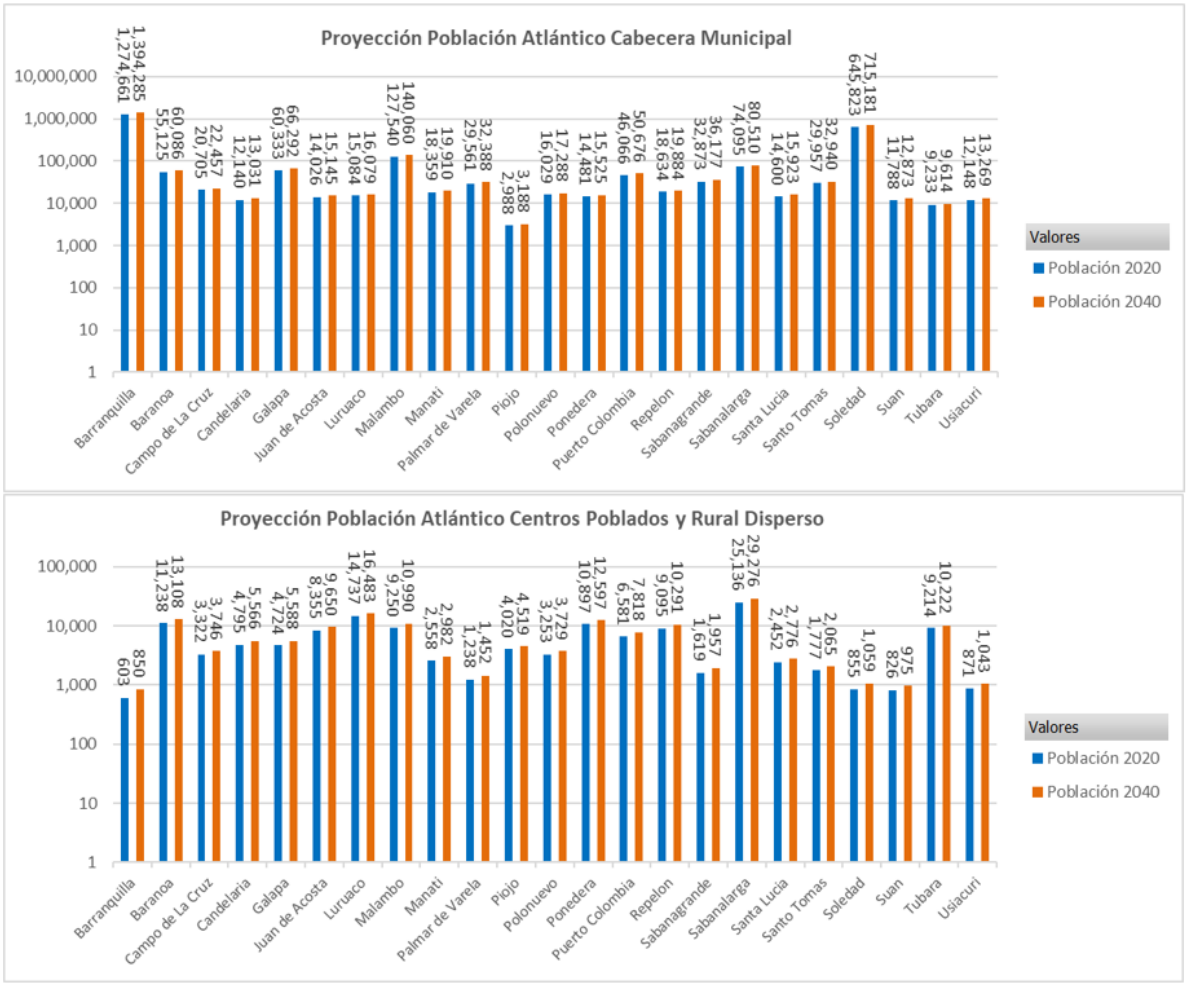


Figura 48. Proyección de la población en el Departamento del Atlántico periodos 2020 y 2040.
Fuente: Elaboración propia a partir de DANE (2018).

5.4.1.1. Módulos de consumo para uso doméstico

De acuerdo con lo establecido en la Tabla B.2.3 del Título B del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS (MINAMBIENTE, 2000), para una zona de clima cálido, como lo es el Departamento del Atlántico, al tener una altitud por debajo de los 1,000 m.s.n.m., y un sistema de complejidad bajo a medio, se asumió una demanda neta de 120 l/habitante al día para la población en cabeceras municipales, considerando perdidas en el sistema de conducción del 30%. Para la población ubicada en centros poblados y zonas rurales dispersas, se asumió una demanda neta de 90 l/habitante al día y un sistema de conducción con pérdidas del 60%.

5.4.1.2. Demanda potencial para uso doméstico en los centros poblados y zonas rurales dispersas

La aproximación de la población localizada en centros poblados y zonas rurales dispersas se obtuvo mediante los siguientes cinco pasos para cada una de las 26 subcuencas delimitadas y presentadas en la sección 3.1.6:

1. Se determinó el área de cada subcuenca utilizando la herramienta ArcGIS
2. Se estimó el área de cada uno de los municipios
3. Se realizó una intersección entre las capas de los pasos 1 y 2 para determinar el área aferente de cada municipio en las 26 subcuencas
4. Se calculó el área de las nuevas superficies urbanas por cada subcuenca con sus respectivos porcentajes por municipio
5. Se determinaron los diferentes atributos como población, viviendas con alcantarillado y sin alcantarillado, entre otros, por el porcentaje de los sectores urbanos y rurales por subcuenca para ser agregado en cada una de ellas.

La población urbana se reajustó empleando información de la CRA, teniendo en cuenta los cambios que ha habido en los últimos años en los municipios que tienen tratamiento de agua.

Para clasificar la población rural entre fuentes de abastecimiento superficiales o subterráneas, se distribuyó la población rural por subcuenca siguiendo una relación porcentual entre las concesiones en cada una de ellas. Es decir, si la población era inicialmente de 1,000 personas y existe una concesión total para uso doméstico rural de 0.5 l/s distribuidas en 0.1 l/s de fuentes subterráneas y 0.4 l/s de fuentes superficiales, la población que se abastece de las fuentes superficiales corresponde a 800 personas (1,000×0.4/0.5) y 200 personas (1,000×0.1/0.5) de una fuente subterránea.

5.4.1.3. Demanda potencial para uso doméstico en las cabeceras municipales

Al definir la demanda potencial para uso doméstico en las cabeceras municipales del Departamento del Atlántico se tuvo en cuenta únicamente aquellas subcuencas donde existen concesiones otorgadas y reglamentadas para uso doméstico (como acueductos) que abastecen a las cabeceras municipales.

A cada una de las 26 subcuencas se le asignó el valor de la población presente en la cabecera municipal a la cual abastece agua según la captación, ya sea por fuente subterránea o superficial. Esta población asignada se multiplicó por la dotación asignada de 120 l/habitante al día, y se tuvo en cuenta las perdidas en el sistema de conducción de 30% (ver sección 5.4.1.1).

A manera de ejemplo, para entender este proceso, la subcuenca MA8 – Arroyo Grande tiene una concesión otorgada para uso doméstico municipal mediante la fuente subterránea del sistema acuífero Sabanalarga, en el municipio de Baranoa, que tiene una población a 2020 de 55,125 habitantes. La demanda potencial bruta o extraída de esta fuente corresponde al producto de los 55,125 habitantes, por una dotación de 120 l/habitante - día, dividido en 0.7 (30% de perdidas en el sistema de conducción) y dividido en 86,400 para pasar de l/día a l/s. La extracción de agua será entonces de 109.4 l/s para satisfacer la demanda de la población.

5.4.2. Demanda potencial de agua para uso agrícola

Para determinar la demanda potencial para uso agrícola se estableció para cada una de las 26 subcuencas el área correspondiente de cultivos transitorios, permanentes y mixtos según la capa de coberturas definida para este estudio y presentada en la sección 3.1.3.

Tomando como referencia la descripción del nivel 4 de la capa de coberturas y las conversaciones con la CRA en los talleres y capacitaciones, se estableció como cultivo permanente representativo del Departamento la palma de aceite. En cultivos transitorios se tiene como categoría los cereales, siendo el arroz el de mayor cobertura en el Departamento. Finalmente, como cultivos mixtos se estableció la combinación de frijol y maíz. Considerando además que, en general, el riego es por superficie de inundación, en la Tabla 18 se presentan los módulos de consumo adoptados para estimar la demanda potencial por hectárea de riego para cada uno de estos cultivos. El módulo de consumo de la palma de aceite se obtuvo a partir del estudio *"costos de operación de tres sistemas de riego en el Campo Experimental Palmar de la Sierra"* de Fedepalma. Para el módulo de consumo del arroz se estimó a partir del estudio *"¿Cuánta agua necesitan los cultivos de arroz en Colombia?"* de la Universidad Nacional de Colombia en el año 2023. Finalmente, para el maíz y frijol se estimó el módulo de consumo a partir del estudio *"Estimación del efecto de la sequía sobre la productividad de frijol en el caribe Colombiano"* de AGROSAVIA.

Tabla 18. Módulos de consumo para cultivos permanentes, transitorios y mixtos.

Cultivo	Módulo de Consumo [l/s-Ha]
Cultivo Permanente – Palma de Aceite	3.2
Cultivo Transitorio – Cereales: Arroz	3.6
Cultivos Mixtos – Maíz y Frijol	0.1

Fuente: Fedepalma (2021), UNAL (2023) y AGROSAVIA (2023).

5.4.3. Demanda potencial de agua para uso pecuario

Para determinar la demanda potencial de agua para uso pecuario se tuvo en cuenta el Censo agropecuario del 2022 para aves y bovinos, por Departamento y municipio, del Instituto Colombiano

Agropecuario (ICA)[11]. La información censal se consolida anualmente para cada especie, por municipio y Departamento, y proviene de 1) registros de vacunación según la especie, 2) información recopilada por los respectivos gremios de cada especie, 3) registros de instituciones públicas como las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATAS) y Secretarías de Desarrollo Agropecuario Municipales y 4) de visitas que realiza el mismo Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). En la Tabla 19 se presenta número total de bovinos y aves presentes en el Departamento del Atlántico para el año 2022.

Tabla 19. Número total de Bovinos y Aves en el Atlántico, año 2022.

Especie	Número de especies en el Atlántico 2022
Bovinos	256,023
Aves	10,084,546

Fuente: A partir de censo agropecuario del 2022 para aves y bovinos, por Departamento y municipio, del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Teniendo la relación del porcentaje de ocupación de cada municipio en cada una de las 26 subcuencas, según se describió en la sección 5.4.1.2, y la población de bovinos y aves por municipio, se pudo determinar la cantidad de bovinos y aves pertenecientes a cada subcuenca. Los bovinos y aves por subcuenca se presentan en el anexo 13.3 al final de este documento.

Finalmente, se estableció el módulo de consumo medio diario para bovinos y aves presentes el cual se presenta en la Tabla 20. Debido a que el Departamento del Atlántico no tiene módulos de consumo, se tomó como referencia el módulo de consumo para bovinos y aves en un clima cálido como el Atlántico del estudio *"Determinación de módulos de consumo de agua para los sectores industrial, pecuario, agrícola, energético y de servicios"* del año 2014 realizado por Corpoboyacá y la Universidad Pontificia Bolivariana.

Tabla 20. Módulos de consumo para bovinos y aves en el Departamento del Atlántico.

Especie	Módulo de Consumo [l/animal – día]
Bovinos	35.0
Aves	0.3

Fuente: Convenio CNV 2014020, Corpoboyacá-Universidad Pontificia Bolivariana.

5.4.4. Demanda potencial de agua para uso industrial, estético y otros usos

Para los usos del agua en el sector industrial, estético, y otros usos como minería o riego de vías, no se estimaron demandas potenciales. Esto se debe a que no se cuenta con información de los módulos de consumo para estos usos, o con estudios sociales y económicos que determinen el cambio futuro en el consumo del recurso hídrico para estos sectores en el Departamento del Atlántico. A partir de esto, para la demanda potencial de agua se consideró la información de concesiones debidamente registrada.

[11] https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018.

6. Escenarios para la Evaluación Regional del Agua

Para la Evaluación Regional del Agua se analizaron 3 períodos: un período histórico, considerando los últimos 30 años (1993 – 2022), y dos períodos futuros que permitan entender las condiciones del Departamento del Atlántico al año 2040. Los períodos futuros corresponden a un período futuro cercano, considerando el período 2011 – 2040, y un futuro lejano, considerando el período 2041 – 2070, siguiendo los períodos de la Tercera Comunicación de Cambio Climático del IDEAM (IDEAM, 2017).

Para cada período se consideraron 3 condiciones en cuanto a demandas o usos de agua. La primera condición o condición natural considera un sistema sin demandas de agua. La segunda condición o condición concesiones, considera demandas en base a las concesiones existentes a la fecha en la CRA (ver sección 5.3). Finalmente, la tercera condición o condición potencial considera las demandas potenciales que podrían existir en el Departamento en función de las coberturas y usos de la tierra, junto a módulos de consumo para cada uno de estos. Esta última condición, para los períodos asociados al futuro cercano y lejano considera el crecimiento de la población proyectado al año 2040 en base a las tasas de crecimiento estimadas por el DANE (ver sección 5.4).

Respecto a la caracterización climática de los períodos a analizar en la ERA, para el período histórico, que cubre los años 1993 a 2022, se consideró la caracterización climática basada en las observaciones presentada en la sección 3.3.1 . Para los períodos futuros, tanto para el período 2011 – 2040 y 2041 – 2070, se consideraron los resultados del GCM MPI-ESM1-2-HR del sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6-IPCC) bajo el escenario de emisiones y socioeconómico SSP5-8.5 (ver sección 3.3.2).

La Figura 49 muestra el enfoque conceptual y metodológico para evaluar los indicadores de la ERA para los períodos y escenarios anteriormente descritos. La Tabla 21 muestra un resumen de los escenarios y sus consideraciones.

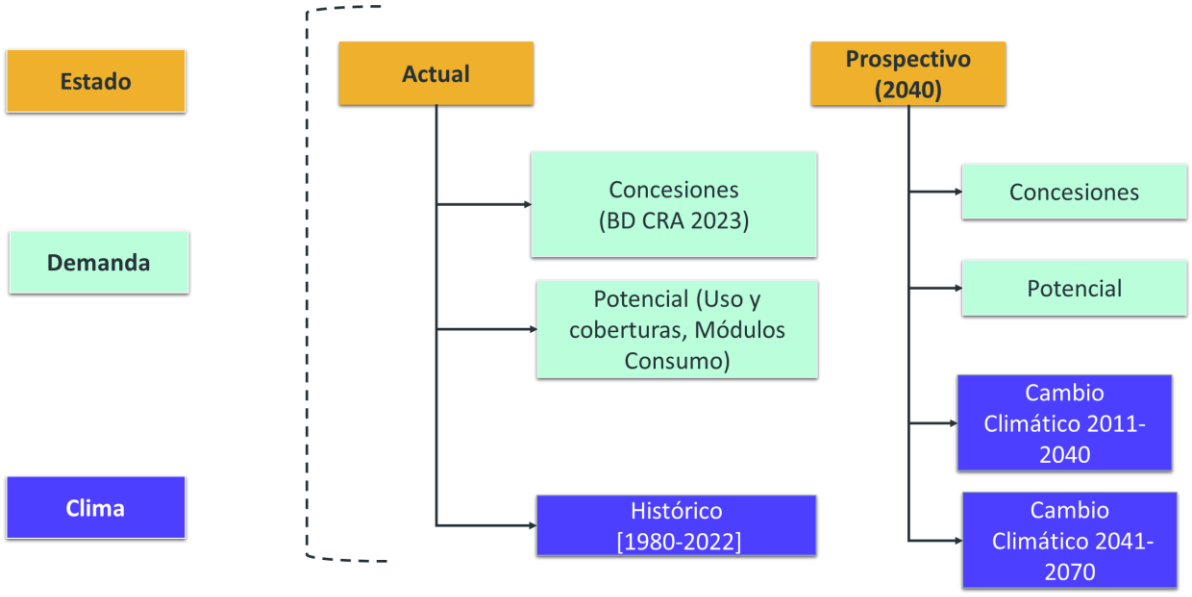


Figura 49. Enfoque conceptual de los escenarios para la Evaluación Regional del Agua.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Síntesis de los escenarios a evaluar en la Evaluación Regional del Agua.

Nombre	Período	Demandas	Clima
Natural histórico	1993-2022	Sin demandas	Observado
Natural CC 2011-2040	2011-2040	Sin demandas	MPI-ESM1-2-HR (AR6 SSP5-8.5)
Natural CC 2041-2070	2041-2070	Sin demandas	MPI-ESM1-2-HR (AR6 SSP5-8.5)
Concesiones histórico	1993-2022	Concesiones CRA	Observado
Concesiones CC 2011-2040	2011-2040	Concesiones CRA	MPI-ESM1-2-HR (AR6 SSP5-8.5)
Concesiones CC 2041-2070	2041-2070	Concesiones CRA	MPI-ESM1-2-HR (AR6 SSP5-8.5)
Potencial histórico	1993-2022	En base a usos consuntivos y coberturas/usos de la tierra	Observado
Potencial CC 2011-2040	2011-2040	En base a usos consuntivos, coberturas/usos de la tierra y proyección de la población	MPI-ESM1-2-HR (AR6 SSP5-8.5)
Potencial CC 2041-2070	2041-2070	En base a usos consuntivos, coberturas/usos de la tierra y proyección de la población	MPI-ESM1-2-HR (AR6 SSP5-8.5)

Fuente: Elaboración propia.

Los escenarios presentados en esta sección serán implementados en la herramienta de modelación, presentada en la sección 7, para evaluar los indicadores de la Evaluación Regional del agua, presentados en la sección 8.

7. Modelo WEAP para la Evaluación Regional del Agua

En esta sección se presenta la herramienta de modelación de recursos hídricos desarrollada en WEAP (Water Evaluation and Planning System) para la Evaluación Regional del Agua en base a la información descrita en este informe. La presentación de la herramienta incluye una descripción de esta, la construcción de cada uno de sus elementos y la información requerida, el proceso de calibración y los resultados relativos al balance hídrico en las subcuencas del Departamento del Atlántico. El modelo desarrollado se entregó a la CRA en un anexo digital llamado *"Modelo_WEAP".*

En WEAP no se modeló calidad de agua, debido a que no se contó con información de monitoreos de calidad de agua enfocado en representar los procesos de transporte y destino de la contaminación. Para esta evaluación, se utilizaron los monitoreos periódicos realizados por la CRA, IDEAM y Cormagdalena, que sirvieron para realizar una evaluación de las mediciones históricas de calidad de agua. Sin embargo, este tipo de aproximación no permite hacer proyecciones futuras de que podría pasar en términos de la calidad del agua de acuerdo con incertidumbre como el cambio climático o el crecimiento de la población.

7.1. ¿Qué es WEAP?

WEAP[12], desarrollado por el Stockholm Environment Institute (SEI), es un modelo de planeamiento integrado del recurso hídrico, que se utiliza para representar las condiciones actuales y futuras del agua en un área determinada y para explorar una amplia gama de demandas y opciones de suministro para equilibrar los objetivos ambientales y de desarrollo (www.weap21.org).

WEAP es una plataforma computacional basada en SIG para la modelación integrada de los factores biofísicos y socioeconómicos que determinan la disponibilidad espacial y temporal de agua en una cuenca (Yates et al. 2005a; Yates et al. 2005b). 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 socioeconómico están asociados principalmente a la demanda de agua y determinan cómo se almacena, asigna y entrega el agua disponible, dentro y/o entre cuencas hidrográficas.

Una de las cualidades de WEAP es la posibilidad de incluir la diversidad de componentes de un sistema de recursos hídricos, tales como estructuras (p.e. regulación, desviación y asignación), y a diferentes tipos de usuarios y demandas (p.e. domésticos, industriales, agrícolas, hidroenergía, caudales ambientales) (Yates et al. 2005a; Yates et al. 2005b). 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 a modelar es representada como un conjunto de unidades hidrológicas (círculo verde en la Figura 50). Los balances hídricos se ejecutan a nivel de cada unidad, resultando en el cálculo de la evapotranspiración, escorrentía, infiltración, entre otros, y posteriormente se integran a través de la red de drenaje (línea celeste en la Figura 50) y al sistema subterráneo (cuadrado celeste en la Figura 50). Por lo tanto, es posible establecer los efectos acumulativos de intervenciones ubicadas aguas arriba en cualquier punto de la cuenca. Dentro de las unidades hidrológicas es posible caracterizar las condiciones climáticas y de cobertura y usos de la tierra, entre otros. Respecto a los usos de agua, WEAP representa las necesidades o demandas de forma explícita mediante sitios de demanda (círculo rojo en la Figura 50), cuantificando y evaluando el nivel de satisfacción o cobertura de las necesidades en función de la disponibilidad hídrica en el sistema. WEAP también representa embalses (triángulo verde en la Figura 50) o elementos de almacenamiento de agua, con la posibilidad de incorporar reglas de operación.

La distribución del agua hacia los distintos sitios de demanda responde a restricciones relacionadas con las características la red de distribución, normas ambientales, así como las prioridades y preferencias asignadas a los puntos de demanda. El cálculo de esta distribución se realiza en base a una rutina de optimización de programación lineal que maximiza la cobertura de los requerimientos de agua (Yates et al. 2005a).

[12] Una descripción completa del modelo WEAP y su funcionamiento se puede consultar en el Manual del Usuario desarrollado por personal de Stockholm Environment Institute (http://www.weap21.org/index.asp?action=208).

Para mayores detalles respecto al funcionamiento de WEAP se sugiere revisar el tutorial disponible de forma gratuita en la página web de WEAP[13].

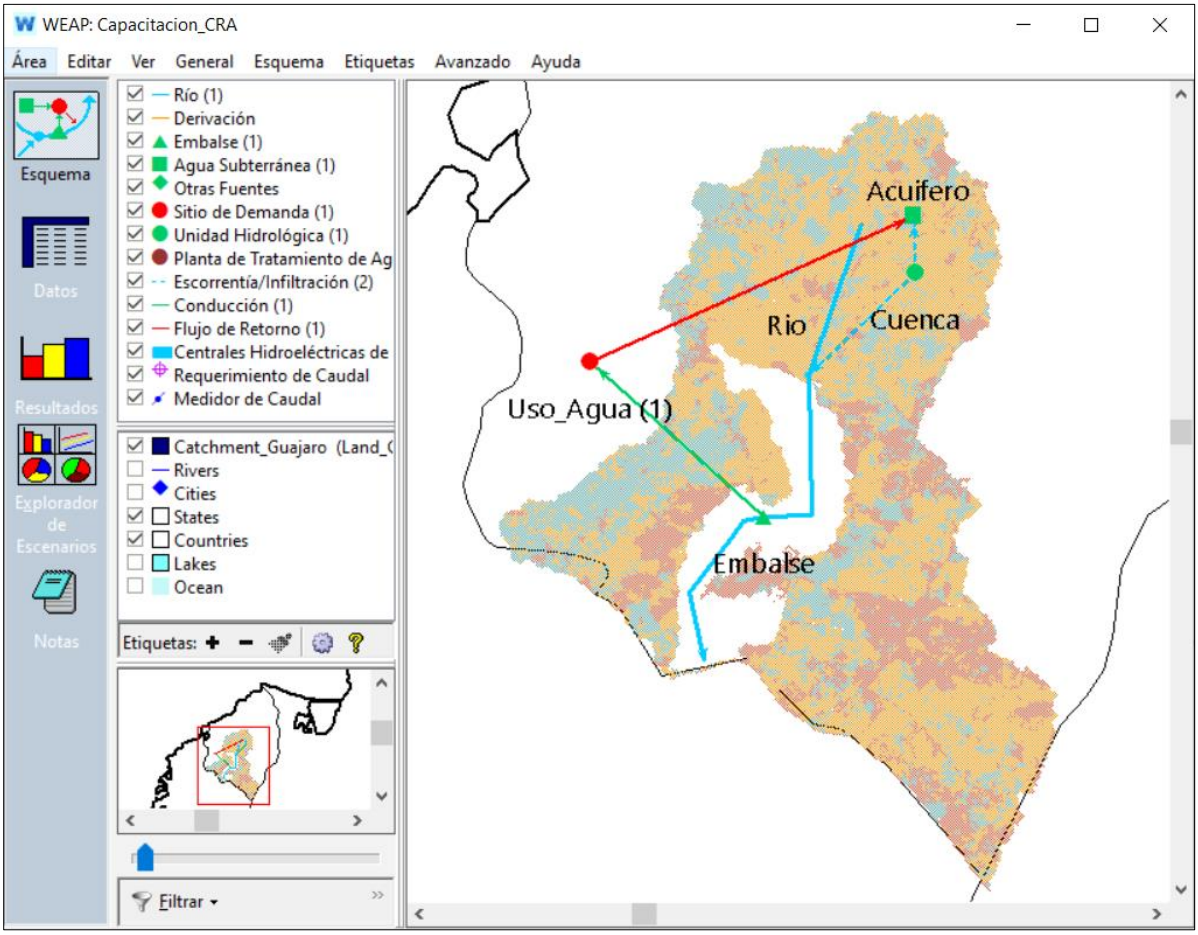


Figura 50. Vista esquemática y ejemplo de conectividad de elementos en WEAP.
Fuente: Captura de pantalla parcial de la interfaz gráfica de WEAP del modelo utilizado en la capacitación de la herramienta durante el desarrollo del ERA-CRA.

De acuerdo con la información compilada en WEAP, es posible tomar otras decisiones como:

- Analizar impactos asociados a cambios en las coberturas vegetales y usos del suelo
- Analizar escenarios alternativos del clima
- Analizar el crecimiento y localización de actividades económicas hidro-dependientes: navegación, hidro-energía, riego
- Comparar reglas de funcionamiento de embalses y requisitos de caudales ambientales
- Comparar reglamentación de corrientes
- Analizar el impacto de asignación y/ o ampliación de concesiones de agua en ríos principales o en cierres de microcuencas
- Estimación de otros índices complementarios e.g. Índice de Escasez

[13] https://www.weap21.org/downloads/WEAP_Tutorial_Spanish.pdf.

7.2. Modelación del balance hídrico

Para la representación del balance hídrico en las unidades hidrológicas de WEAP se consideró el método de humedad de suelo (SMM por sus siglas en inglés). Este método calcula el balance hídrico como una respuesta a forzantes climáticas y a la caracterización del sistema físico. La Figura 51 muestra una representación esquemática del método y los flujos asociados.

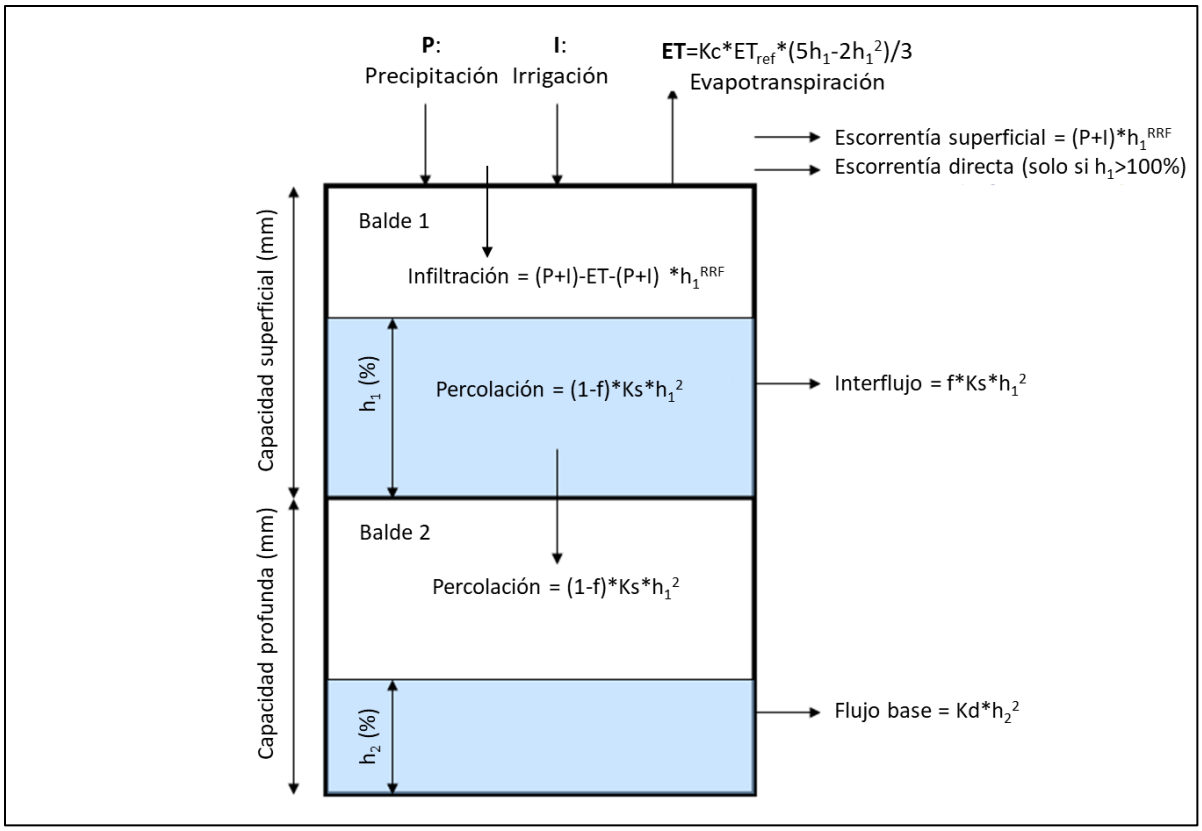


Figura 51. Representación esquemática del método de humedad de suelo de WEAP.
Fuente: Modificado del tutorial WEAP en inglés[14].

El método de humedad de suelo subdivide verticalmente la unidad hidrológica en 2 baldes: el primer balde o balde superior representa la zona radicular y el segundo balde o balde inferior representa la zona profunda. En el balde superior del suelo, WEAP simula la evapotranspiración, la escorrentía superficial e interflujo, cambios en la humedad del suelo y la percolación a partir de la precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y fracción nubosa. En el balde inferior, WEAP calcula el flujo base o flujo subterráneo hacia el sistema superficial en función de la humedad de la zona profunda. Este método permite evaluar el impacto de cambios en la cobertura y uso de la tierra, además de cambios en las condiciones climáticas.

Los flujos horizontales que muestra la Figura 51 desembocan en el elemento río de WEAP conectado a la unidad hidrológica. y la evapotranspiración es considerada por WEAP como una salida o pérdida del sistema. La evapotranspiración de referencia (ET_{ref} en la Figura 51) es calculada internamente en

[14] Tutorial WEAP en inglés: https://www.weap21.org/downloads/weap_tutorial.pdf.

WEAP mediante la ecuación de Penman-Monteith a partir de la temperatura, velocidad del viento a 2 m sobre el suelo, humedad relativa y fracción nubosa.

El método de humedad de suelo permite subdividir el área representada por la unidad hidrológica en distintas sub-áreas que representen distintas caracterizaciones del sistema superficial, como, por ejemplo, distintas coberturas del suelo, pendientes de la superficie del terreno, caracterización de las primeras capas de suelo, entre otras. Esto permite tener un mayor nivel de detalle dentro de una cuenca o subcuenca sin la necesidad de representar el área como cuencas distintas.

Es importante notar que el método de humedad de suelo es un modelo cuasi-físico que representa los procesos físicos a partir de ecuaciones paramétricas, por lo que la caracterización del medio físico no responde directo a parámetros medidos en el suelo, sino que a partir de parámetros que relacionan las características propias del suelo y los flujos de agua a través de estos (Yates et al., 2005a).

El uso del método de humedad de suelo requiere de la caracterización de los parámetros presentados en la Figura 51 para cada una de las subdivisiones de área. Estos parámetros se listan a continuación y se describen en la Tabla 22.

- K_c: Coeficiente de cultivos (sin unidades)
- RRF: Factor de resistencia a la escorrentía (sin unidades)
- f: Dirección preferente de flujo del balde 1 (sin unidades)
- K_s: Conductividad del primer balde (longitud/tiempo)
- S_w: Capacidad de almacenamiento del primer balde (longitud)
- K_d: Conductividad del segundo balde (longitud/tiempo)
- D_w: Capacidad del almacenamiento del segundo balde (longitud)

Tabla 22. Descripción de parámetros del método de humedad de suelo.

Parámetro	Descripción
K_c	Factor de corrección de la evapotranspiración de referencia, el cual multiplica la evapotranspiración referencia (ET_{ref}), calculada con la ecuación de Penman-Monteith, para calcular la evapotranspiración potencial (ETP) para un cultivo particular. Su valor depende principalmente del tipo de cobertura del suelo y su etapa de desarrollo.
S_W	Altura de agua que es capaz de almacenar el primer balde del método de humedad de suelo. Su valor depende principalmente del tipo de suelo.
D_W	Altura de agua que es capaz de almacenar el segundo balde del método de humedad de suelo. Se estima un único valor para el área de la cuenca asumiendo un solo reservorio horizontal subterráneo. Su valor depende principalmente de la caracterización geológica.
RRF	Factor que controla la respuesta de la escorrentía superficial acorde con las características fisiográficas de la cuenca como la vegetación, pendiente, pedregosidad, entre otras. Para valores altos del parámetro hay bajas tasas de escorrentía y para valores bajos hay altas tasas de escorrentía. Su valor depende principalmente de la cobertura del suelo y la pendiente de este.
K_S	Indica el flujo subsuperficial máximo de agua que puede transmitir el suelo cuando se encuentra completamente saturado, es decir, su objetivo es caracterizar la capacidad del suelo para transmitir agua. Su valor depende principalmente del tipo de suelo.
K_D	Indica el flujo profundo máximo que puede transmitir la zona profunda cuando está al 100% de su capacidad de almacenamiento. Su valor depende principalmente de las características geológicas.

Parámetro	Descripción
f	Indica el fraccionamiento del flujo desde el primer balde. Toma valores entre 0 y 1, donde 1 significa que el flujo es 100% horizontal (solo interflujo), 0 significa que el flujo es 100% vertical (solo percolación). Su valor depende principalmente de la cobertura de suelo y la pendiente de este.
Z_1 y Z_2	Son la condición inicial de la saturación del balde superior e inferior. En general es un parámetro que se ajusta hasta encontrar un equilibrio con las condiciones climáticas y de flujo en los primeros períodos de simulación.

Fuente: Elaboración propia.

El método de humedad de suelo por sí solo no permite cuantificar la recarga al sistema subterráneo y el almacenamiento asociado. Una alternativa para poder cuantificar la recarga y almacenamiento subterráneo es enlazar un elemento de aguas subterráneas de WEAP (como se muestra en la Figura 50). Cuando un elemento de unidad hidrológica se enlaza a un elemento de aguas subterráneas, el método de humedad de suelo reemplaza el segundo balde por el elemento de aguas subterráneas. Esto permite explorar directamente los flujos en el sistema subterráneo. En dicho caso, los parámetros D_w y K_d ya no son necesarios de caracterizar. En este estudio se consideró esta estructura para representar los flujos al sistema subterráneo.

7.3. Construcción del modelo WEAP

En las siguientes secciones se presentan los elementos que constituyen el modelo WEAP para la ERA de la CRA, de aquí en adelante, el modelo ERA-CRA. Esta sección sigue un orden elemento a elemento WEAP, excepto para la representación del embalse El Guájaro, debido a que combina diversos elementos, por lo que se detalla al final de la sección.

7.3.1. Elemento unidad hidrológica

Los elementos unidad hidrológica en WEAP cumplen el rol de calcular el balance hídrico de sub-áreas dentro del área de estudio en función de la caracterización del sistema físico. Para el modelo ERA-CRA se implementó un elemento unidad hidrológica para cada una de las subcuencas presentadas en la sección 3.1.6, con el objetivo de una caracterización consistente con el estudio del Índice del Uso del Agua (CRA, 2013). Todos los elementos unidad hidrológica utilizan el método de humedad de suelos para el cálculo del balance hídrico (ver sección 7.2). Los elementos unidad hidrológica incorporados en el modelo WEAP se presentan en la Figura 52.

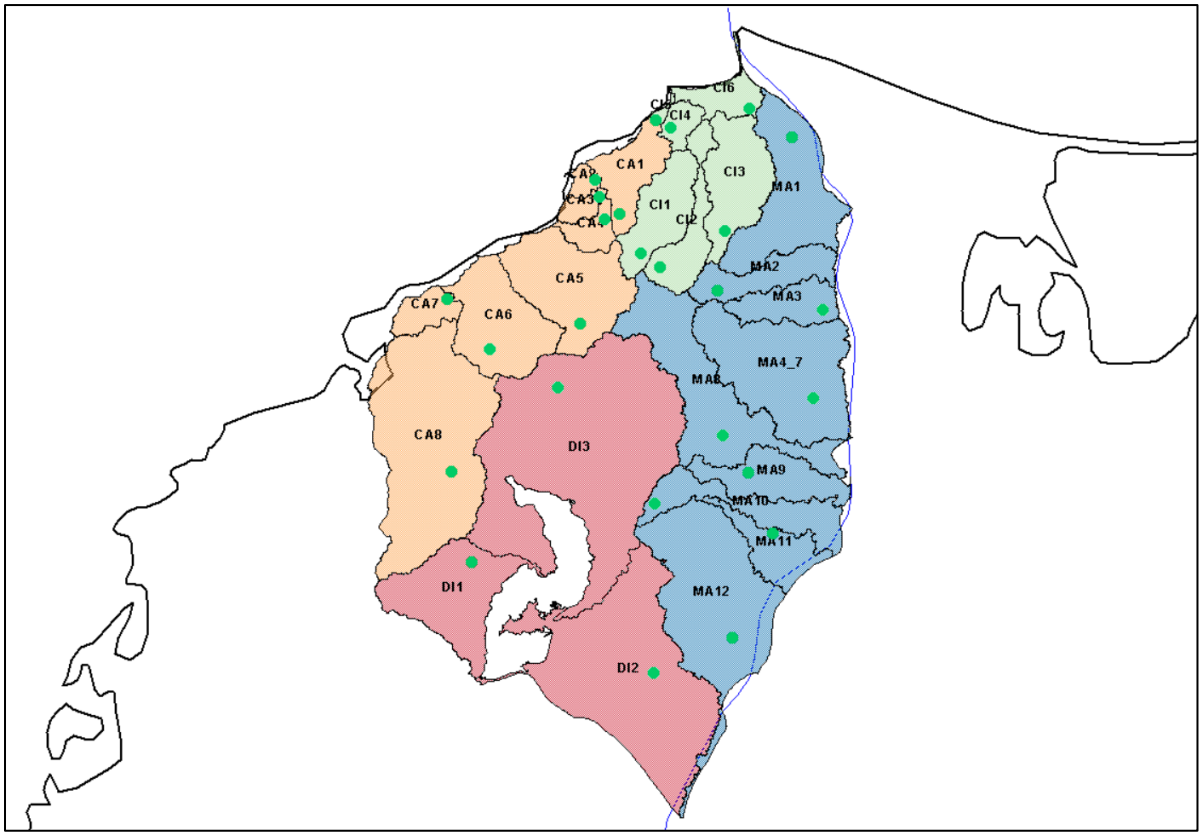


Figura 52. Vista esquemática de los elementos unidad hidrológica en WEAP.
Fuente: Elaboración propia.

Las unidades hidrológicas se codificaron de forma consistente con las subcuencas presentadas en el estudio del Índice del Uso del Agua (CRA, 2013) (ver Tabla 8) y se presenta en la Figura 52. La codificación de las unidades hidrológicas de la subzona hidrográfica Magdalena es de la forma MAX, donde X es un número que va del 1 al 12; sin embargo, las numeraciones 4 a 7 se agrupan en la unidad hidrológica MA4_7 (ver Tabla 8). La codificación de las unidades hidrológicas de la subzona hidrográfica Mallorquín es de la forma CIX, donde X es un número que va del 1 al 6. La codificación de las unidades hidrológicas de la subzona hidrográfica Caribe es de la forma CAX, donde X es un número que va del 1 al 8. Finalmente, la codificación de las unidades hidrológicas de la subzona hidrográfica Canal del Dique margen derecho es de la forma DIX, donde X es un número que va del 1 al 3.

En las siguientes sub-secciones se presenta la caracterización tanto del medio físico como climática de las unidades hidrológicas.

7.3.1.1. Caracterización de las unidades hidrológicas

La caracterización de las unidades hidrológicas se realizó en base a la información y categorías de cobertura y uso de la tierra, suelos y pendientes y la delimitación de zonas acuíferas presentada en las secciones 3.1.3, 3.1.4 y 3.1.5, respectivamente. Las categorías se resumen en la Tabla 23.

Tabla 23. Resumen de las categorías de zonas acuíferas, cobertura y uso de la tierra, suelo y pendiente.

Zona acuífero	Cobertura y uso de la tierra	Suelo	Pendiente
Acuífero	Agrícola	Fino	Planicie suave
No acuífero	Área abierta	Moderado	Moderado
	Bosque	Grueso	Empinado
	Cuerpo de agua	Zona urbana	Fuerte
	Minería	Cuerpo de agua	No definido
	Pasto	No definido	
	Urbano		
	Cultivos transitorios		
	Cultivos permanentes		
	No definido		

Fuente: Elaboración propia.

Un primer paso para la caracterización de las unidades hidrológicas es definir las áreas que las componen. Para esto, se realizó un cruce espacial para determinar el área de cada una de las categorías de zona acuífera, cobertura y uso de la tierra, suelo y pendiente. La subdivisión de cada unidad hidrológica siguió la siguiente jerarquía:

- Nivel 1: Zona acuífera o no acuífera
- Nivel 2: Cobertura y uso de la tierra
- Nivel 3: Suelo
- Nivel 4: Pendiente

Esta subdivisión resultó en 228 combinaciones de zona acuífero – cobertura y uso de la tierra – suelo – pendiente para la totalidad del Departamento del Atlántico. A modo de ejemplo, la Figura 53 muestra la estructura interna en WEAP de las subdivisiones de la unidad hidrológica CI5 y la Tabla 24 muestra el detalle las áreas de cada una de las subdivisiones que componen esta unidad hidrológica. En el archivo *"Areas_UH_WEAP.xlsx"* que acompaña a este informe, se encuentran el detalle para la totalidad de unidades hidrológicas incorporadas en el modelo ERA-CRA.

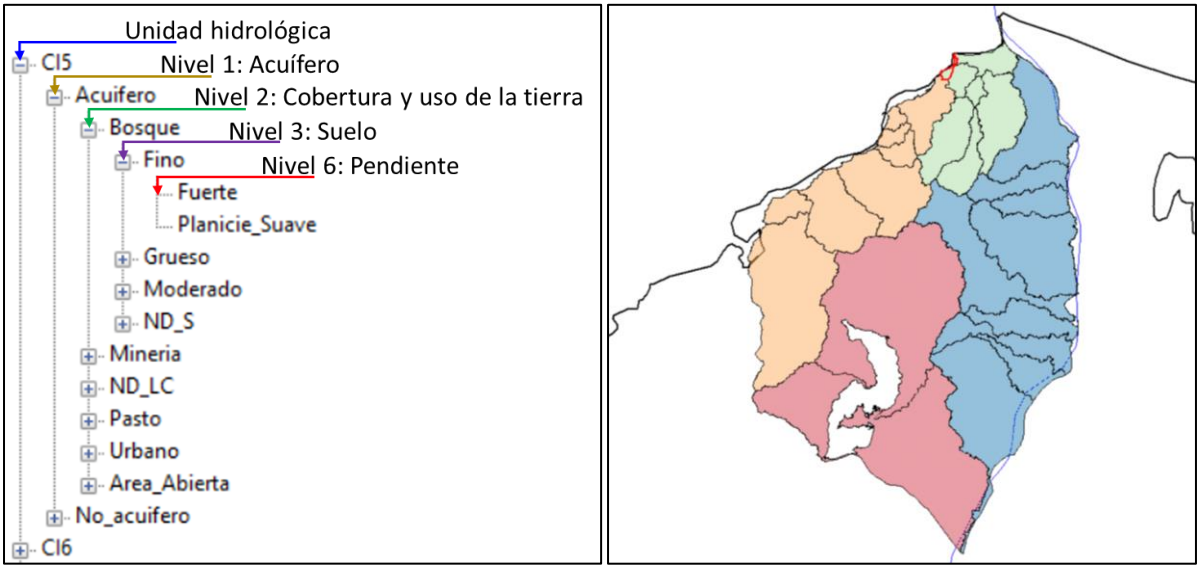


Figura 53. Ejemplo de estructura interna de la unidad hidrológica CI5.
Nota: La unidad hidrológica de WEAP mostrada corresponde a la destacada en rojo en el panel derecho, subcuenca CI5.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Ejemplo de la subdivisión interna de áreas para la unidad hidrológica CI5 con la convención incorporada en WEAP.

Unidad hidrológica	Nivel 1 (Acuífero)	Nivel 2 (Cobertura y uso)	Nivel 3 (Suelo)	Nivel 4 (Pendiente)	Área (Ha)[1]
CI5	Acuifero	Area_Abierta	Fino	Planicie_Suave	5.1
CI5	Acuifero	Area_Abierta	Grueso	Moderado	1.8
CI5	Acuifero	Bosque	Fino	Fuerte	0.0
CI5	Acuifero	Bosque	Fino	Planicie_Suave	1.9
CI5	Acuifero	Bosque	Grueso	Empinado	24.7
CI5	Acuifero	Bosque	Grueso	Moderado	68.3
CI5	Acuifero	Bosque	Moderado	Empinado	55.4
CI5	Acuifero	Bosque	ND_S	ND_P	4.9
CI5	Acuifero	Mineria	Fino	Fuerte	2.9
CI5	Acuifero	Mineria	Moderado	Empinado	8.5
CI5	Acuifero	ND_LC	Fino	Planicie_Suave	4.6
CI5	Acuifero	ND_LC	Grueso	Empinado	0.0
CI5	Acuifero	ND_LC	Grueso	Moderado	0.0
CI5	Acuifero	Pasto	Fino	Fuerte	0.7
CI5	Acuifero	Pasto	Fino	Planicie_Suave	0.1
CI5	Acuifero	Pasto	Grueso	Empinado	3.0
CI5	Acuifero	Pasto	Grueso	Moderado	40.1
CI5	Acuifero	Pasto	Moderado	Empinado	13.5
CI5	Acuifero	Pasto	ND_S	ND_P	2.6
CI5	Acuifero	Urbano	Fino	Fuerte	0.0
CI5	Acuifero	Urbano	Fino	Planicie_Suave	8.5
CI5	Acuifero	Urbano	Grueso	Empinado	16.8
CI5	Acuifero	Urbano	Grueso	Moderado	80.7
CI5	Acuifero	Urbano	Moderado	Empinado	8.1
CI5	Acuifero	Urbano	ND_S	ND_P	0.2
CI5	Acuifero	Urbano	Zona_Urbana	ND_P	38.6
CI5	No_acuifero	ND_LC	ND_S	ND_P	0.5
CI5	No_acuifero	Pasto	ND_S	ND_P	0.1
CI5	No_acuifero	Urbano	ND_S	ND_P	1.2

[1]: Las categorías con área de 0.0 Ha si tienen área (menor a 0.1 Ha), pero se presentan acá con 1 decimal.
Fuente: Elaboración propia.

Un segundo paso para la caracterización de las unidades hidrológicas es la definición de los parámetros del método de cálculo, en este caso, el método de humedad de suelo. En el modelo ERA-CRA se definieron variables globales como Supuestos Claves de WEAP (o Key Assumptions en inglés) para cada parámetro, desagregado por los factores que lo determinan (ver Tabla 22). Por ejemplo, el coeficiente de cultivos (K_c) se considera determinado por la cobertura y uso de suelo, por lo que hay un único parámetro Kc_LC_i para cada categoría i de cobertura y uso de la tierra. Por otro lado, el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) depende tanto de la cobertura y uso de suelo como de la pendiente, por lo que hay un parámetro RRF_LC_i y un parámetro RRF_P_j para cada categoría i de cobertura y uso de la tierra y para cada categoría j de pendiente. De esta forma, el valor final del factor de resistencia a la escorrentía se calcula como el producto entre RRF_LC_i y RRF_P_j. En la Tabla 25 se muestra una síntesis de esta estructura.

Tabla 25. Estructura para el cálculo de parámetros del método de humedad de suelo para cada categoría de la subdivisión de las unidades hidrológicas en WEAP.

Parámetro método humedad de suelo	Símbolo	Determinante	Cálculo
Coeficiente de cultivo	K_c	Cobertura y uso de la tierra	KC_LC_i
Factor de resistencia a la escorrentía	RRF	Cobertura y uso de la tierra; pendiente del terreno	RRF_LC_i x RRF_P_j
Dirección preferencial de flujo	f	Cobertura y uso de la tierra; pendiente del terreno	RRF_LC_i x RRF_P_j
Conductividad del primer balde	K_S	Suelo	Ks_S_k
Capacidad de almacenamiento del primer balde	S_w	Suelo	Sw_S_k

Nota: i, j y k corresponden a cada categoría de cobertura y uso de la tierra (LC), pendiente (P) y suelo (S), respectivamente.
Fuente: Elaboración propia.

Tal como se indica en la sección 7.2, el método de humedad de suelo se complementó con un elemento de agua subterránea para cada unidad hidrológica (ver sección 7.3.3 y 7.3.5). Esto, con el fin de poder representar de mejor manera la recarga al sistema subterráneo. Sin embargo, el solo hecho de generar la conexión unidad hidrológica – agua subterránea no es suficiente para representar la recarga en zonas permeables y recarga nula en zonas impermeables. Para esto, se definió que en las categorías No_acuifero, independientemente del tipo de suelo y pendiente del terreno, la dirección preferencial de flujo será completamente horizontal ($f = 1$). De esta forma, los flujos del primer balde serán solo interflujo y no habrá flujo hacia el sistema subterráneo, resultando en que los flujos hacia el sistema subterráneo provengan únicamente de las zonas acuíferas en función de la cobertura y uso de la tierra y pendiente del terreno. Es por este motivo por el cual los parámetros asociados al segundo balde del método de humedad de suelo no se presentan en esta sección.

Debido a que no hay información de caudales dentro del Departamento del Atlántico, no fue posible realizar una calibración de los parámetros de las unidades hidrológicas de forma directa. En la sección 7.4 se presenta la estrategia y proceso de calibración de los parámetros. No se consideró la información de niveles del embalse porque estos responden a procesos externos, como el control de inundaciones aguas abajo del Canal del Dique y el control de procesos migratorio de peces, por lo que replicarlos no es un objetivo del modelo.

7.3.1.2. Información climática

La caracterización climática de las unidades hidrológicas se realizó en base a la información presentada en la sección 3.3. La información de precipitación y temperatura histórica para cada unidad hidrológica se construyó en base a la regionalización de la respectiva variable, considerando un promedio ponderado de las celdas del producto grillado y su nivel de traslape con los polígonos de las unidades hidrológicas (subcuencas). De esta forma, se obtiene una serie de tiempo continua a escala diaria de precipitación y temperatura para cada unidad hidrológica por separado. Los valores promedio multianual de precipitación y temperatura del período 1993 – 2022 de cada unidad hidrológica se presenta en la Figura 54 y Figura 55, respectivamente.

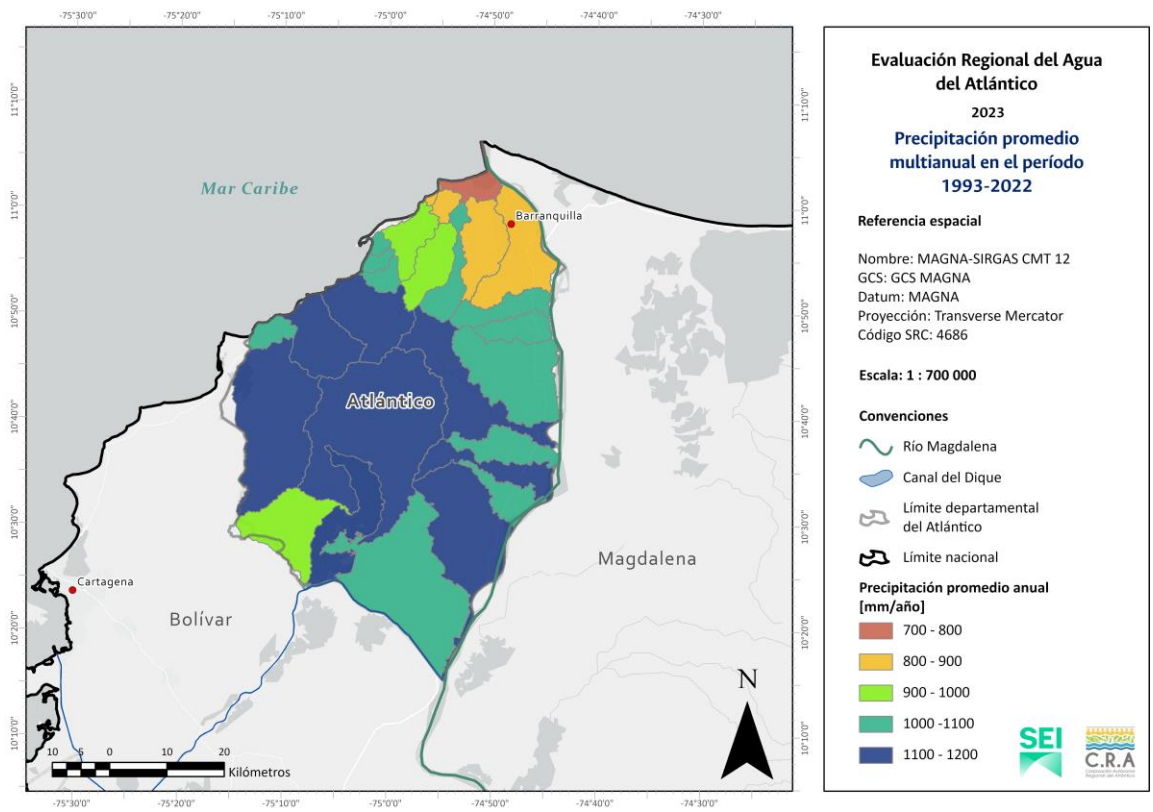


Figura 54. Precipitación promedio multianual en el período 1993 – 2022 para cada unidad hidrológica de WEAP. Fuente: Elaboración propia.

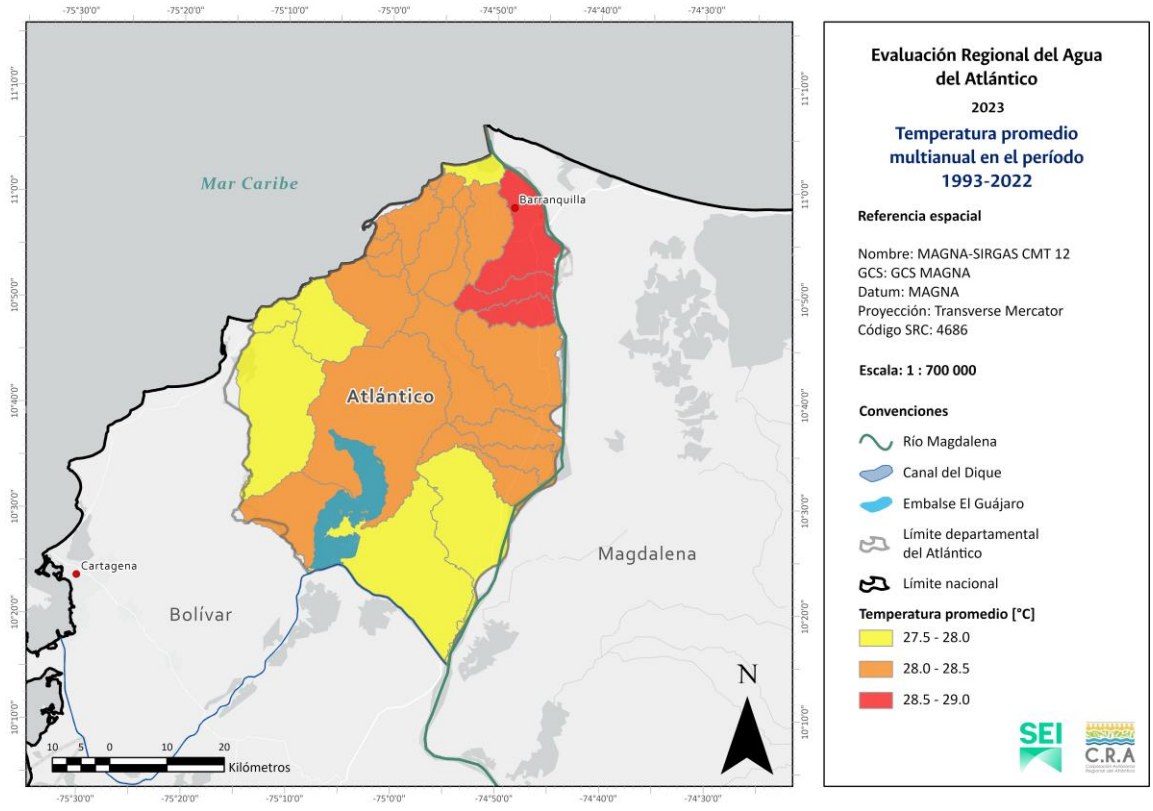


Figura 55. Temperatura promedio multianual en el período 1993-2022 para cada unidad hidrológica de WEAP. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la información de velocidad del viento a 2 m sobre el suelo, humedad relativa y fracción nubosa, se ingresó la información promedio diaria presentada en la sección 3.3.1.2. Debido a la poca información, se consideró que la información promedio es válida para todo el período de simulación tanto histórico como futuro, de forma cíclica.

Para la información futura de precipitación y temperatura, dado que la información cruda de los GCM no se debe utilizar directamente para análisis a escala local, se realizó un escalamiento estadístico para pasar de la información global del GCM MPI-ESM1-2-HR, bajo el escenario SSP5-8.5, a la escala de cada una de las unidades hidrológicas. El procedimiento de escalamiento, tanto para temperatura como precipitación, se inspira en el documento técnico que da soporte al reglamento chileno para la evaluación de la componente cambio climático en la evaluación del recurso hídrico "*Criterio de Evaluación Ambiental en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico*"[15] (SEA, 2023) y se describe a continuación:

- Se realizó una interpolación bilineal de los resultados del GCM MPI-ESM1-2-HR, bajo el escenario SSP5-8.5, a una resolución de 0.1 grados para representar los gradientes de la información a escala gruesa. Notar que este paso no agrega ni corrige información, solo la extiende a puntos intermedios de la grilla original.
- Se extrajo la información climática para cada unidad hidrológica mediante promedios ponderados según el área de traslape entre el polígono y las celdas de la grilla de 0.1 grados de resolución.
- Se realizó una corrección de sesgo continua y a escala mensual[16] mediante el método Unbiased Quantile Mapping (Chadwick et al., 2023), considerando como referencia el período 1985 – 2014. Se consideró este período porque corresponde a los últimos 30 años del período histórico de los GCM del AR6-IPCC. Este proceso se realizó para cada una de las unidades hidrológicas de WEAP, considerando la información del período 1985 – 2014.
- En base a las observaciones a escala diaria ingresadas en cada unidad hidrológica, se realizó una desagregación con el método k-NN de las series corregidas para pasar de la escala mensual a la diaria.
- La serie climática se incorporó en WEAP.

Este procedimiento tiene como objetivo preservar las tendencias del GCM y las condiciones locales tanto en los valores medios como en la variabilidad, evitando incorporar sesgos no deseados a la información cruda del GCM. Es importante notar que, como se comentó en la sección 3.3.2.2, al comparar los promedios del período 1985 – 2014 y 1993 – 2022 del GCM y las observaciones, los cambios en temperaturas eran iguales, pero en precipitación el GCM subestima los cambios en un 2%, lo que puede dar lugar a leves diferencias entre la proyección del GCM y la serie corregida. Los cambios proyectados a los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022, para la precipitación y temperatura se presentan en la Figura 56 y Figura 57, respectivamente.

[15] https://sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/Resoluci%C3%B3n_202399101883_DT_Cambio%20clim%C3%A1tico%20en%20recursos%20h%C3%ADdricos_2023.pdf.

[16] https://github.com/saedoquililongo/climQMBC.

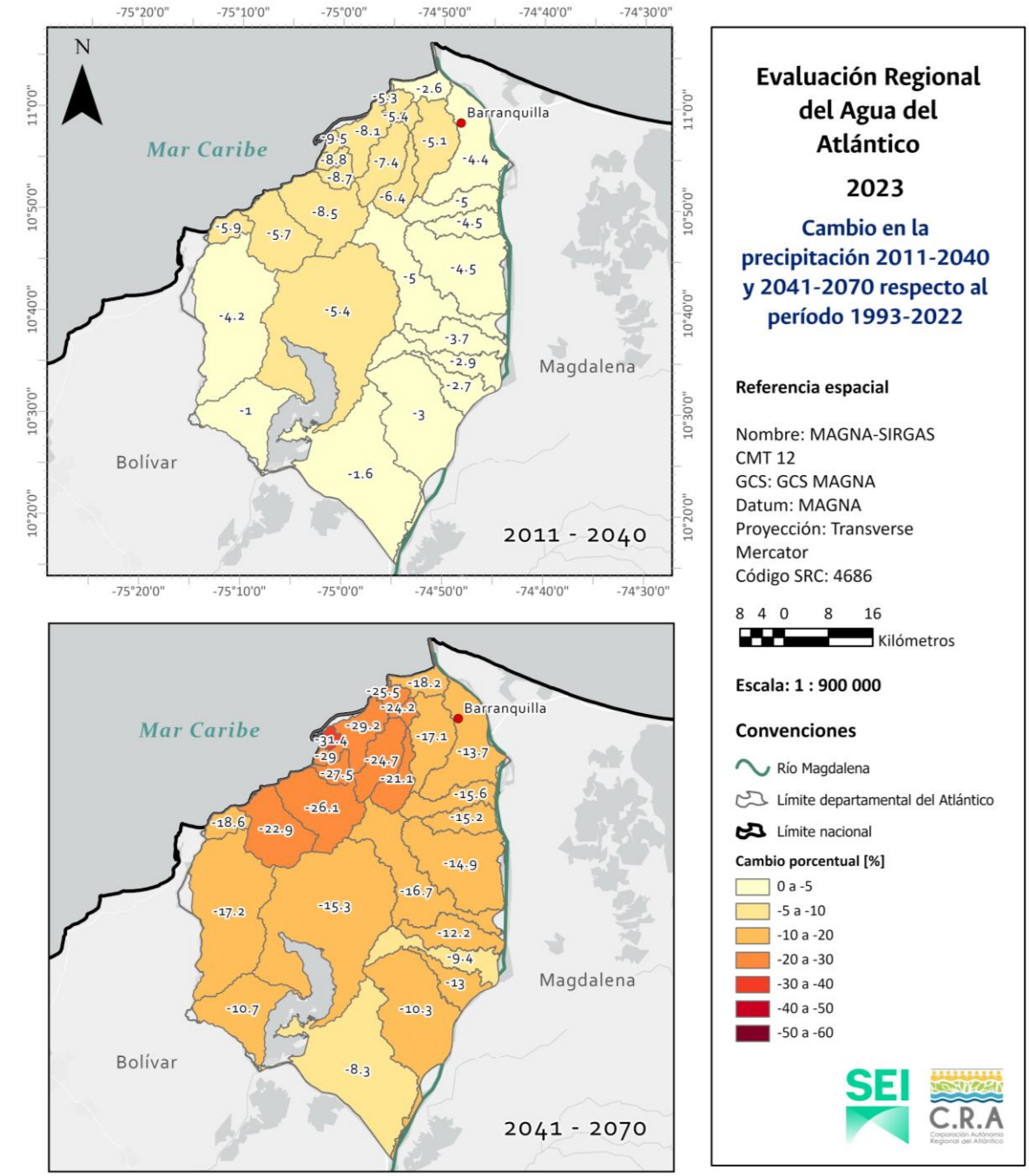


Figura 56. Cambio en la precipitación al 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993-2022.
Fuente: Elaboración propia.

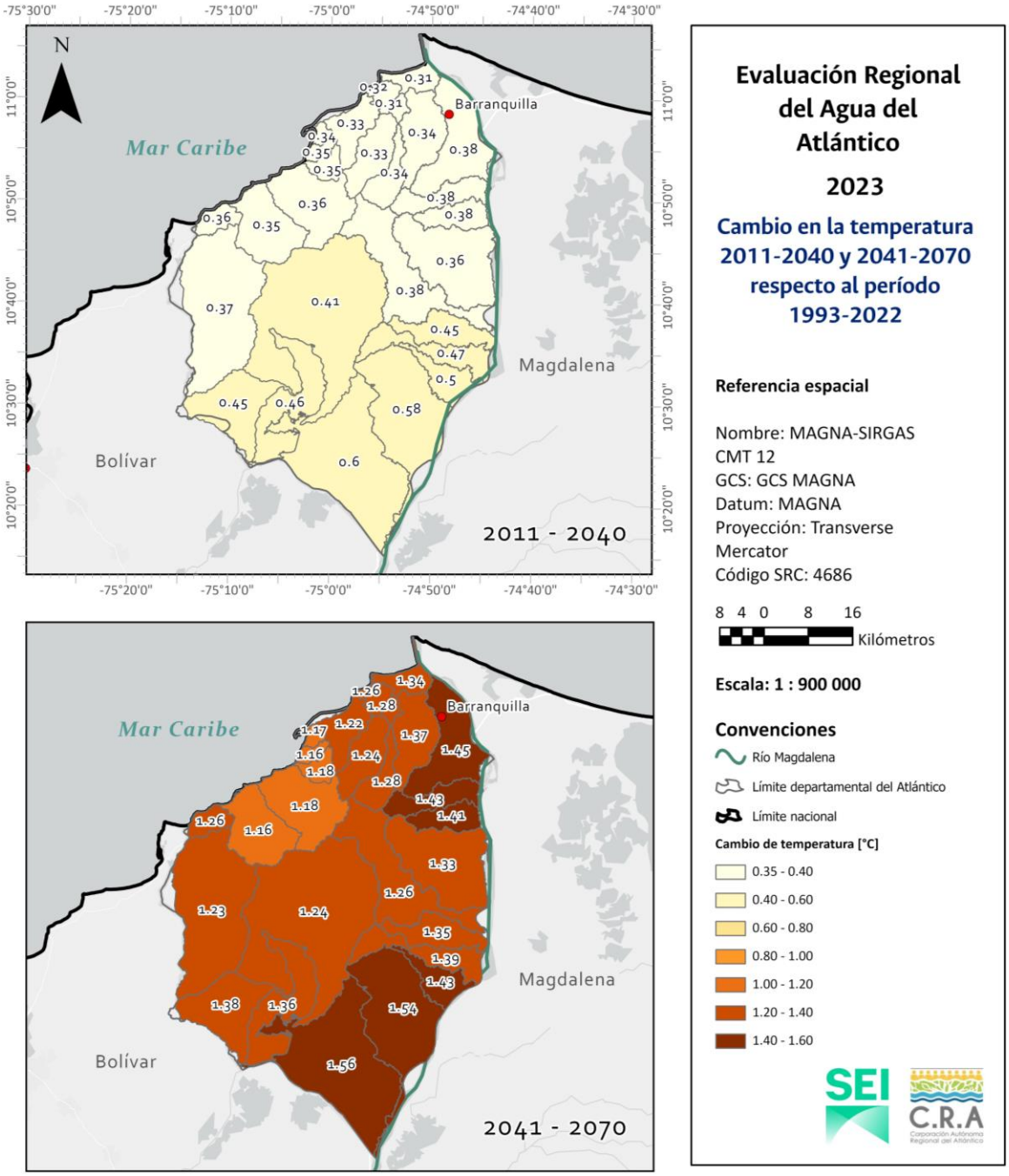


Figura 57. Cambio en la temperatura al 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993-2022.
Fuente: Elaboración propia.

El escenario de cambio climático considerado en el modelo ERA-CRA muestran un aumento constante en las temperaturas en todo el Departamento del Atlántico, con aumentos entre 0 y 1.8 °C. Los mayores cambios se encuentran en el borde oriental del Departamento y acentúan en el sur. Por otro lado, respecto a los cambios en precipitación, estos muestran una disminución constante en todo el Departamento del Atlántico, con disminuciones entre 0 y 35%. A diferencia de la temperatura, los mayores cambios en precipitación se encuentran en el borde occidental, acentuándose en el sector norte de la subzona hidrográfica Caribe.

7.3.2. Elemento río

Los elementos ríos en WEAP cumplen el rol de transportar agua a lo largo del área de estudio, siendo al mismo tiempo una fuente desde la cual se puede extraer agua y retornar vertimientos. Para el modelo ERA-CRA se consideró un elemento río por cada unidad hidrográfica, tomando como referencia el cauce principal de la red de drenaje presentada en la sección 3.1.2, asociado a cada una de las subcuencas presentadas en la sección 3.1.6. Los elementos ríos resultante se presentan en la Figura 58.

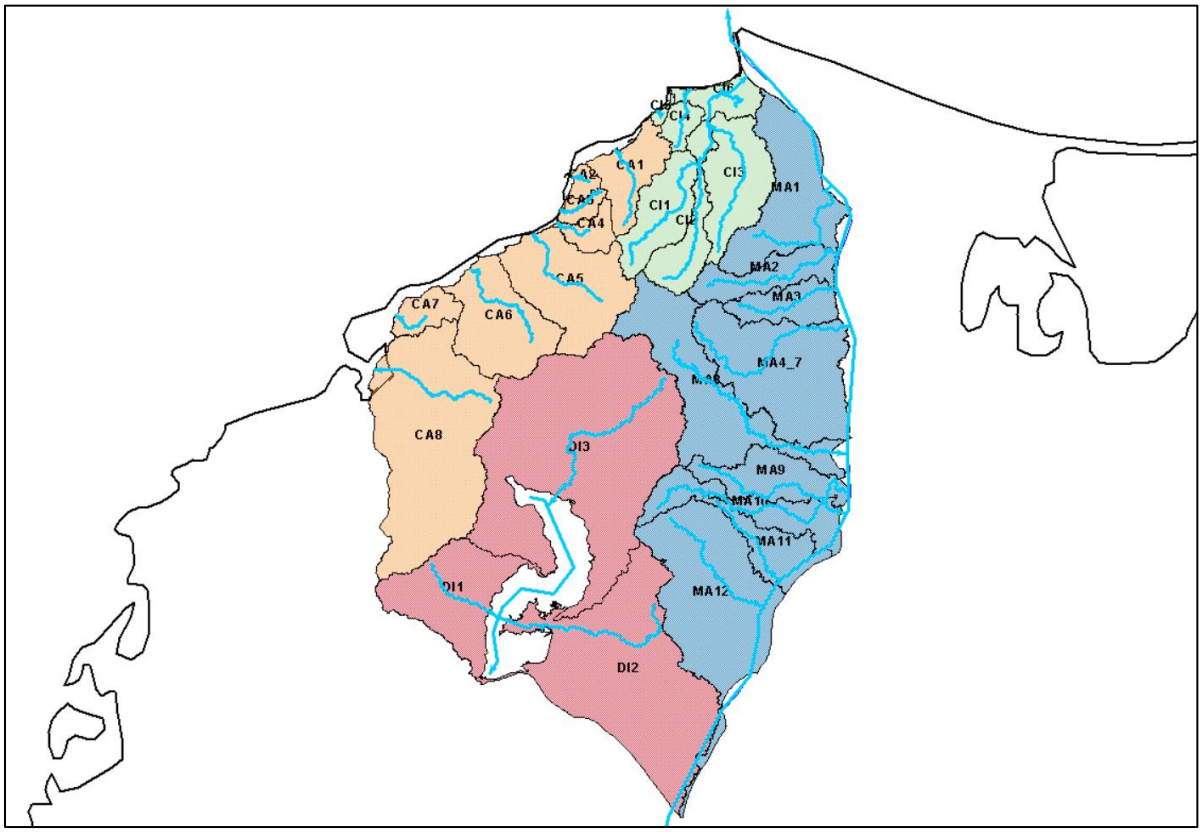


Figura 58. Vista esquemática de los elementos río en WEAP.
Fuente: Elaboración propia.

La convención para la codificación de cada uno de los ríos es *R_UH*, donde UH es el código de la unidad hidrológica a la cual está asociada el elemento río. Por ejemplo, para la unidad hidrológica DI3, el código del elemento río asociado es R_DI3.

Adicional a los elementos río asociados a las unidades hidrológicas del Departamento del Atlántico, se incorporaron dos elementos río adicionales. El primero corresponde al río Magdalena (codificado como *Rio_Magdalena*), donde confluyen los elementos río de la subzona hidrográfica Magdalena. Debido a que los aportes al río Magdalena desde el Departamento del Atlántico son bajos comparados al caudal del río Magdalena, este elemento río no tiene un caudal de cabecera, sino que solo representa los aportes desde el Departamento del Atlántico. El segundo elemento río adicional corresponde a un río auxiliar (codificado como *R_Guajaro_aux*) que recibe todos los aportes desde las unidades hidrológicas que desembocan en el embalse El Guájaro. Es en este elemento río donde se incorporará el elemento embalse asociado al embalse El Guájaro (ver sección 7.3.8).

Es importante recordar que los elementos WEAP son completamente esquemáticos y que lo relevante son las conexiones y en orden en que estas están dispuestas. En esa línea, la correcta o incorrecta diagramación de los elementos ríos no influye en los resultados.

7.3.3. Elemento agua subterránea

Los elementos agua subterránea en WEAP cumplen el rol de almacenar agua en sectores específicos y al mismo tiempo tiene la capacidad tanto de suministrar agua como de recibir vertimientos. Para el modelo ERA-CRA se enlazó un elemento de aguas subterráneas a cada uno de los elementos unidad hidrológica. De esta forma, el segundo balde del método de humedad de suelo es reemplazado por este elemento aguas subterráneas (ver sección 7.2) y recibe la recarga resultante del balance hídrico superficial. Los elementos agua subterránea incorporados en el modelo WEAP se presentan en la Figura 59.

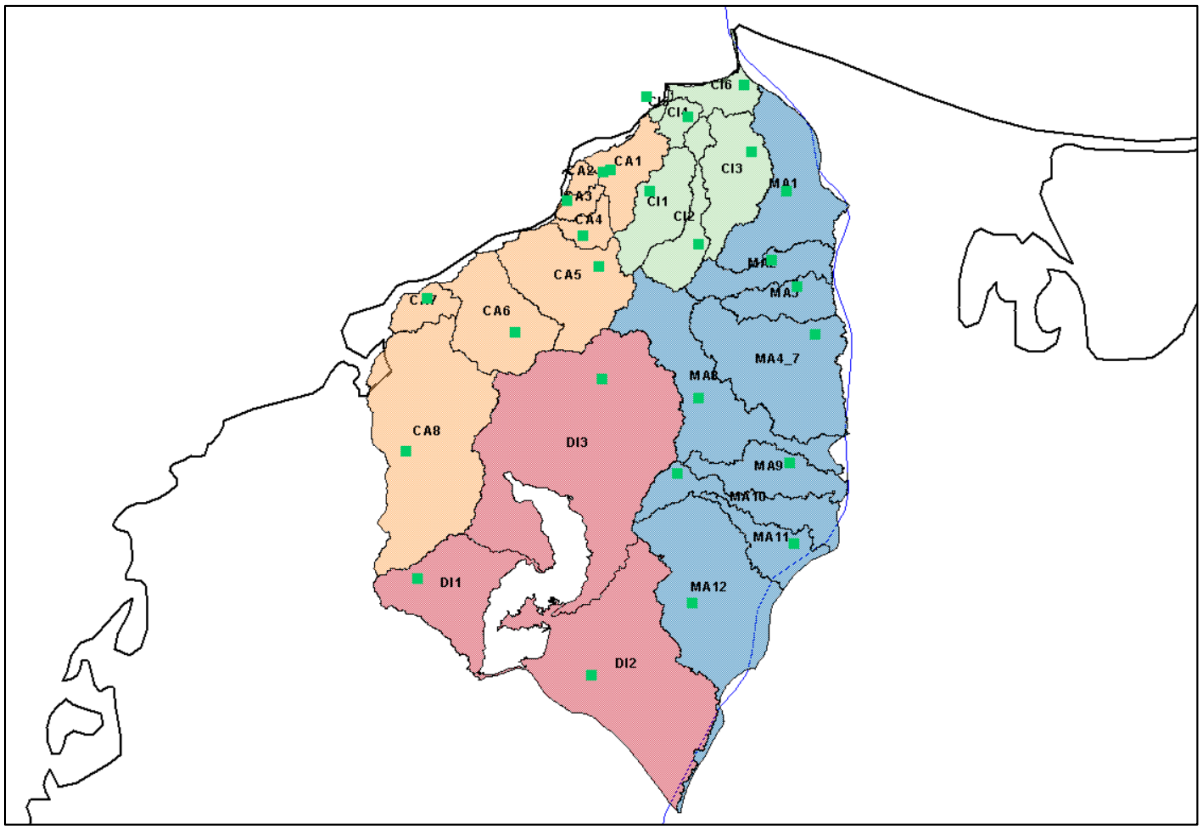


Figura 59. Vista esquemática de los elementos agua subterránea en WEAP.
Fuente: Elaboración propia.

La convención para la codificación de cada uno de los elementos agua subterránea es *GW_UH*, donde UH es el código de la unidad hidrológica a la cual está asociada el elemento agua subterránea. Por ejemplo, para la unidad hidrológica DI3, el código del elemento agua subterránea asociado es GW_DI3.

Dada la caracterización de los elementos unidad hidrológica, la recarga es representada para las zonas donde se encuentran los sistemas acuíferos identificados en la sección 3.1.5 (Figura 9 y Figura 10). Es decir, no se representa directamente la recarga a los sistemas acuíferos, sino que al área subyacente

a las subcuencas. Sin embargo, esta recarga se puede redistribuir en función de las áreas de cada sistema acuífero y así representar la recarga a estos.

7.3.4. Elemento sitio de demanda

Los elementos sitio de demanda cumplen el rol de representar requerimientos de agua para diversos usos y solicitarlo a distintas fuentes. Para el modelo ERA-CRA se consideró un elemento sitio de demanda por cada unidad hidrológica. Los elementos sitio de demanda incorporados para representar usos de agua en el modelo WEAP se presentan en la Figura 60.

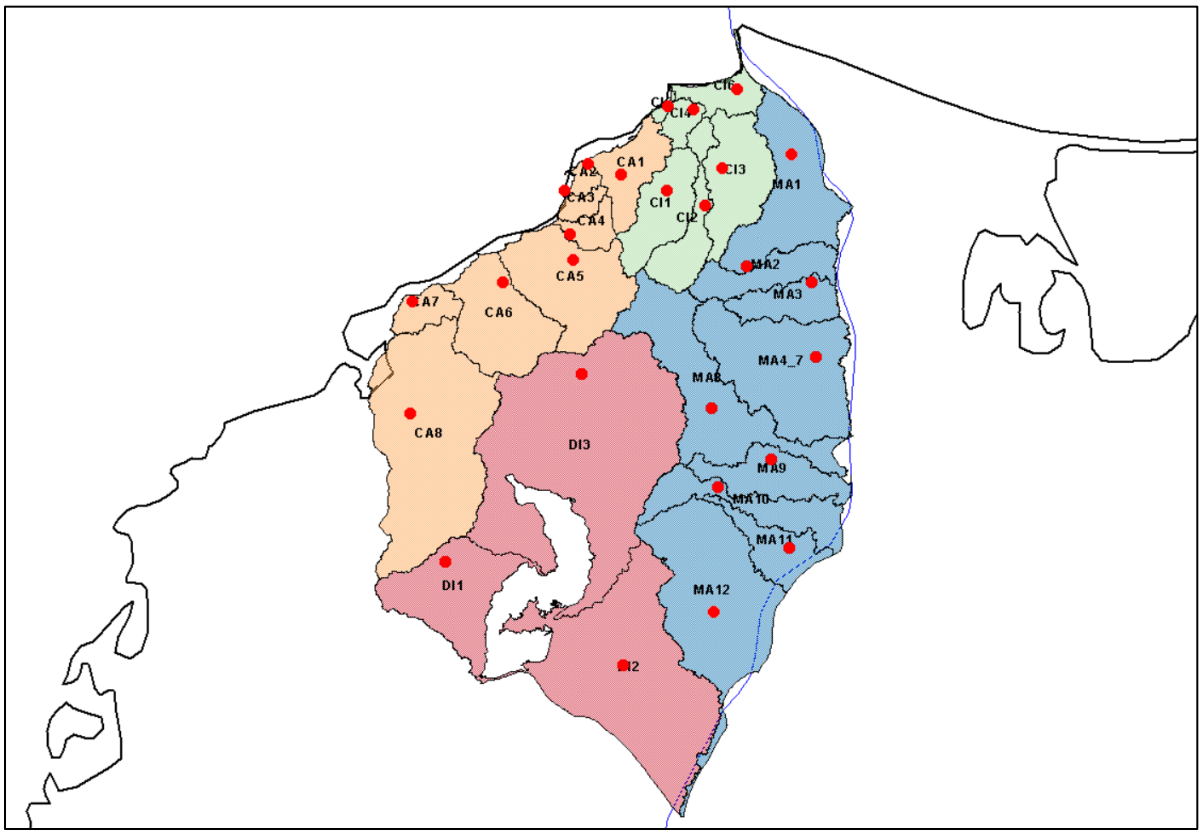


Figura 60. Vista esquemática de los elementos sitio de demanda en WEAP.
Fuente: Elaboración propia.

La convención para la codificación de cada uno de los sitios de demanda *D_UH*, donde UH es el código de la unidad hidrológica a la cual está asociada el elemento sitio de demanda. Por ejemplo, para la unidad hidrológica DI3, el código del elemento sitio de demanda asociado es D_DI3.

Cada elemento sitio de demanda se subdividió para diferenciar las fuentes de abastecimiento superficial y subterránea. Luego, cada una de las fuentes se subdividió según los distintos usos. A modo de ejemplo, la Figura 61 muestra la subdivisión interna del sitio de demanda D_CI5. Cada una de estas categorías es alimentada con la información presentada en la sección 5, para los distintos escenarios de uso de agua. Es importante notar que, si bien la información se ingresa al modelo de forma desagregada según fuente y uso, WEAP calcula una demanda neta como un único valor para cada paso de tiempo, representativo de la demanda total de las subcategorías.

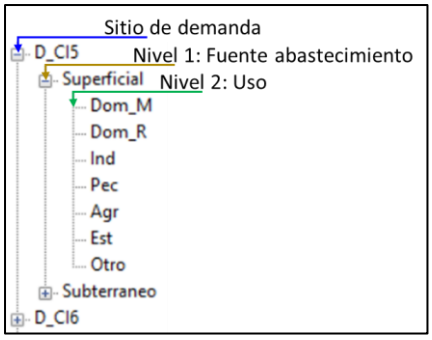


Figura 61. Ejemplo de estructura interna de los sitios de demanda.
Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que no se consideraron las demandas asociadas a las tres fuentes que no son relevantes para efectos de la ERA porque no corresponden a cauces de agua dentro de una subcuenca perteneciente al Departamento del Atlántico: río Magdalena, canal del Dique y embalse el Guájaro.

7.3.5. Enlace escorrentía/infiltración

El enlace de escorrentía/infiltración transmiten los flujos desde una unidad hidrológica a los elementos río y agua subterránea, en caso de que aplique. La distribución de los caudales está gobernada por el factor de dirección preferente de flujo, f, del primer balde del método de humedad de suelo. La Figura 62 muestra los enlaces utilizados en el modelo ERA-CRA, diferenciando entre los enlaces unidad hidrológica-río y unidad hidrológica-agua subterránea.

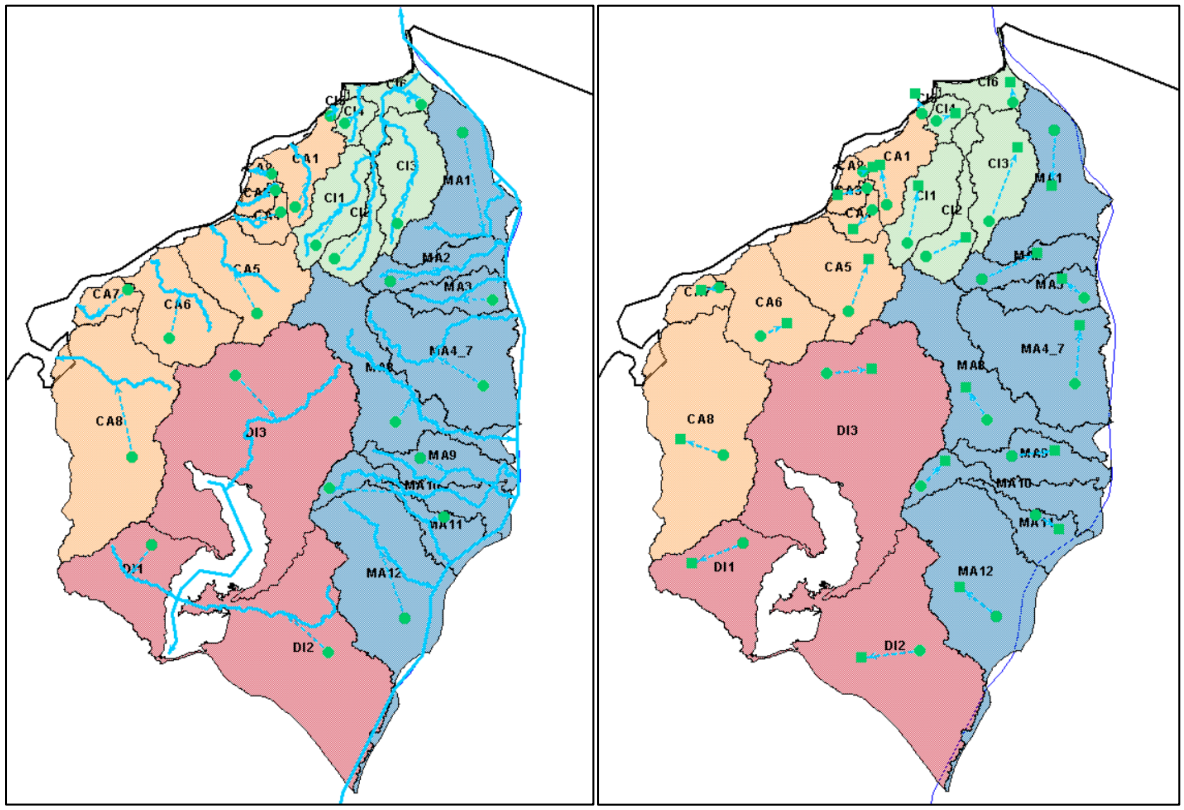


Figura 62. Vista esquemática de los enlaces escorrentía/infiltración en WEAP. (izquierda) Conexión unidad hidrológica-río y (derecha) conexión unidad hidrológica-agua subterránea.
Fuente: Elaboración propia.

7.3.6. Enlace conducción

El enlace de conducción transmite flujos en respuesta a un requerimiento de agua entre una fuente y un receptor. Para efectos del modelo ERA-CRA, los elementos río, agua subterránea, embalse, sitio de demanda y otras fuentes pueden ser considerado como fuentes y elementos como el sitio de demanda o unidad hidrológica (en caso de que se considere riego como una demanda en base al déficit evapotranspirativo) pueden ser considerados como receptor. La Figura 63 muestra los enlaces utilizados en el modelo ERA-CRA, diferenciando entre los enlaces unidad río-sitio de demanda y agua subterránea-sitio de demanda.

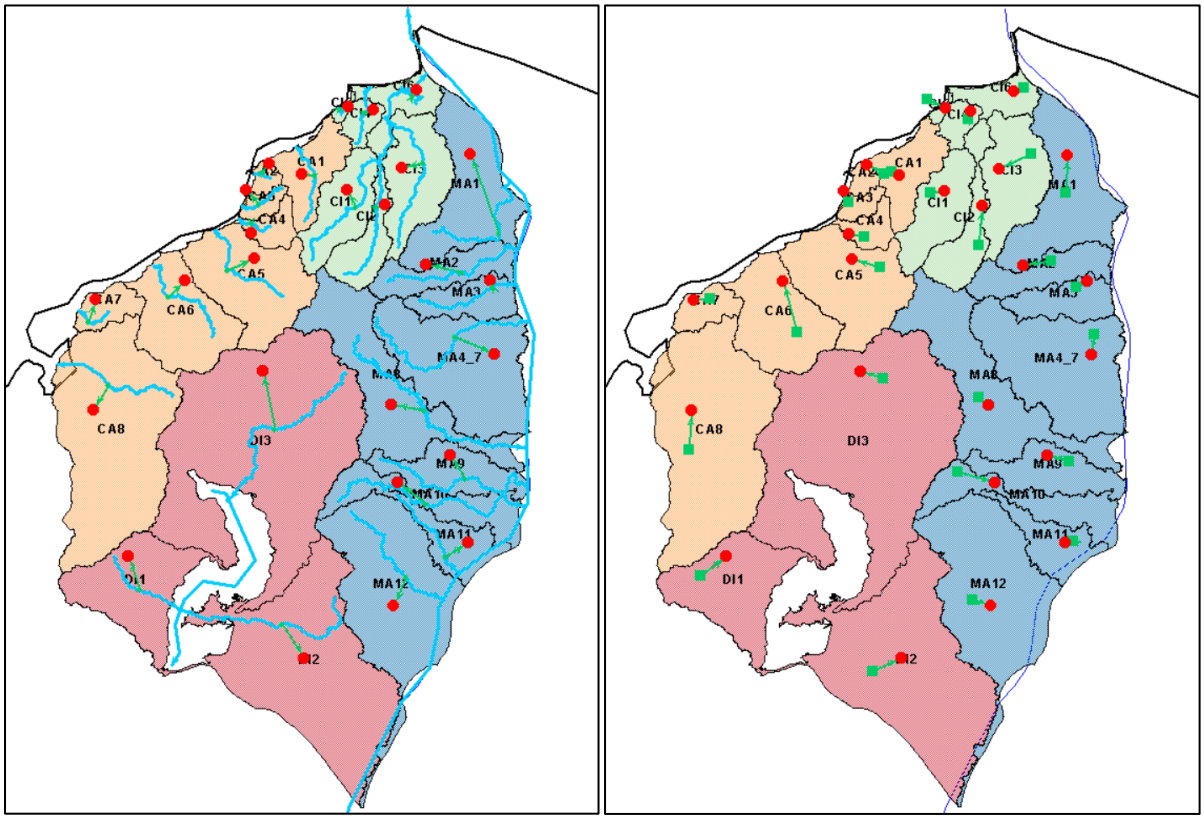


Figura 63. Vista esquemática de los enlaces conducción en WEAP. (izquierda) Conexión río-sitio de demanda y (derecha) conexión agua subterránea-sitio de demanda.
Fuente: Elaboración propia.

En caso de que un sitio de demanda sea abastecido por múltiples fuentes, pero que tengan una jerarquía o prioridad asociado, esta información se puede incorporar directamente en la información del enlace conducción. De esta forma, el elemento se abastecerá del enlace que tenga mayor prioridad y cuando este no tenga la capacidad de abastecerlo, buscará en las prioridades menores. Adicionalmente, a los elementos conducción se les puede restringir la capacidad o caudal a conducir, ya sea por normativa o capacidad de la infraestructura.

7.3.7. Enlace flujo de retorno

El enlace de flujo de retorno transmite flujos en respuesta a un suministro no consumido que se retorna a alguna fuente. Para efectos del modelo ERA-CRA, los enlaces flujo de retorno conducen agua desde elementos sito de demanda hacia elementos río o embalse; sin embargo, los elementos agua

subterránea también podrían recibir agua desde flujos de retorno. La Figura 63 muestra los enlaces utilizados en el modelo ERA-CRA, diferenciando entre los enlaces sitio de demanda-río.

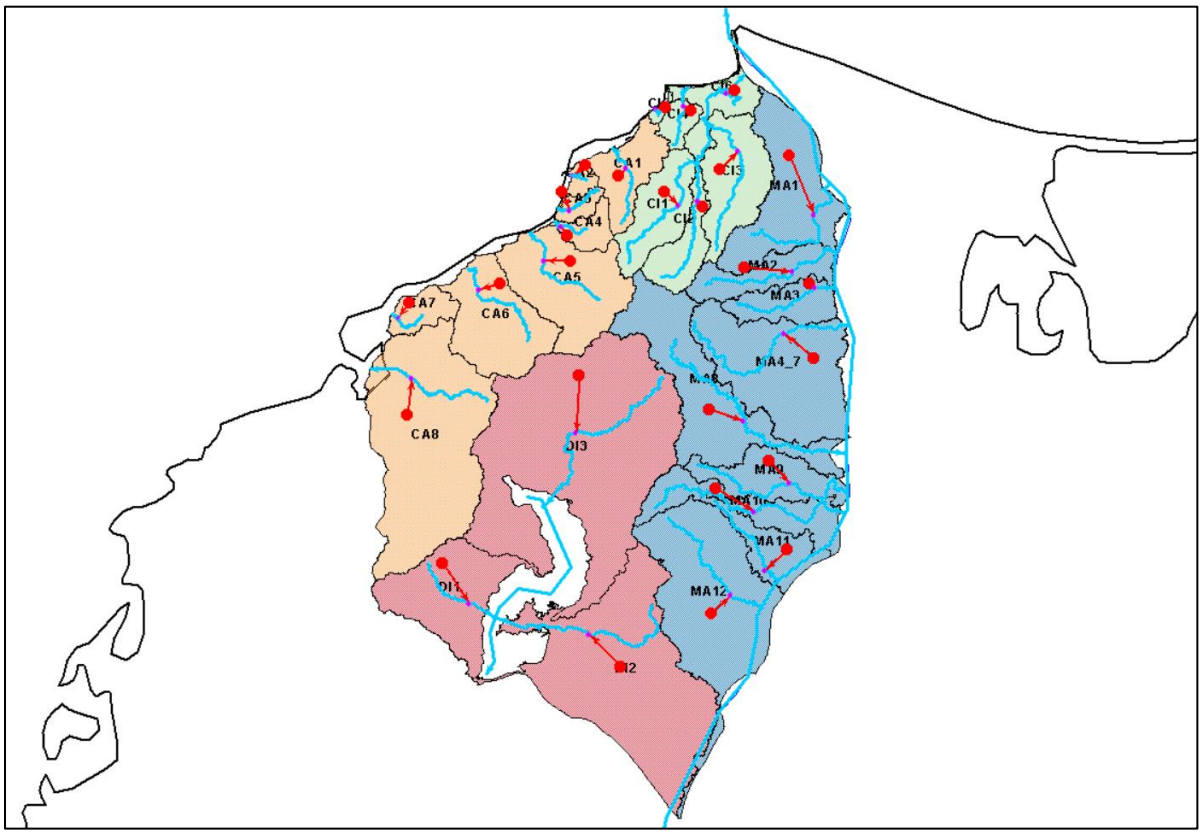


Figura 64. Vista esquemática de los enlaces flujo de retorno en WEAP.
Fuente: Elaboración propia.

En caso de que un sitio de demanda vierta hacia múltiples receptores, el usuario debe definir la proporción en que los flujos se distribuyen.

7.3.8. Elemento Embalse – Embalse El Guájaro

El embalse el Guájaro se representó con un elemento embalse en WEAP. Este elemento cumple el rol de almacenar agua y al mismo tiempo tiene la capacidad tanto de suministrar agua como de recibir vertimientos. El elemento embalse está diseñado para responder a reglas de operaciones, además de ser un elemento que puede retener agua del cauce superficial sobre el cual se dispone, con el objetivo de poder suministrar necesidades futuras.

El embalse El Guájaro recibe agua desde las subcuencas DI1, DI2 y DI3, representadas en WEAP como unidades hidrográficas con los mismos nombres. Para poder capturar todos los aportes y entregarlos al elemento embalse que representa el embalse El Guájaro se incorporó un elemento río *R_Guajaro_aux* (ver sección 7.3.2), el cual recibe los escurrimientos superficiales de los elementos río R_DI1, R_DI2 y R_DI3, y sobre este río se dispuso el elemento de embalse, codificado como *Embalse_Guajaro*. Este esquema es presentado en la Figura 65.

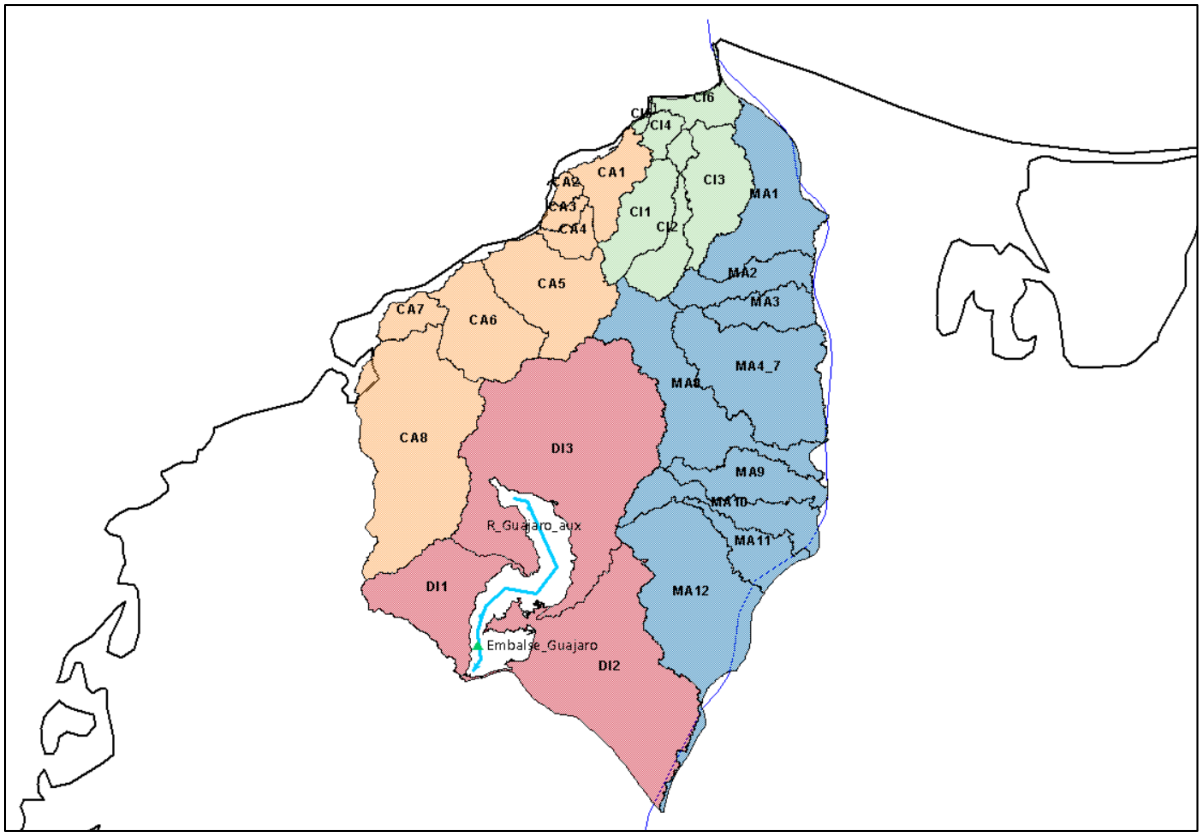


Figura 65. Vista esquemática del elemento embalse en WEAP que representa el embalse El Guájaro.
Fuente: Elaboración propia.

Además de la regla de operación que pueda tener un embalse, para representar un embalse en WEAP se requiere de una curva de volumen-elevación, un volumen inicial almacenado y la evaporación neta. La curva de volumen-elevación se incorporó en base a la información presentada del embalse El Guájaro en la sección 3.2.1, considerando intervalos de elevación cada 0.5 m (Figura 66). La curva de volumen-elevación se extendió hasta los 9 m para efectos de no representar explícitamente potenciales desbordamientos. Es importante notar que en WEAP se debe ingresar la información de elevación respecto a la parte más baja del embalse y no respecto al nivel del mar. A partir de esta curva, se definió una condición inicial de volumen almacenado de 216,000,000 m^3, asociado a una elevación de 3.5 m, la cual es la elevación objetivo para comenzar el año según la regla de operación del embalse (ver sección 3.2.1).

Respecto a la evaporación neta del embalse, dado que esta corresponde a la evaporación de lámina libre, se asumió que la evaporación es igual a la evapotranspiración potencial del cuerpo de agua. Esta evaporación se calculó como la evapotranspiración potencial promedio de las unidades hidrológicas colindantes al embalse (unidades hidrológicas C_DI1, C_DI2 y C_DI3), multiplicada por el coeficiente de cultivo asociado a cuerpo de agua. De esta forma, la evaporación neta se calculó como la diferencia entre la evaporación del embalse y la precipitación total en el embalse, ambos en milímetros por día. Valores positivos de evaporación neta (evaporación es mayor a precipitación) corresponden a salidas del embalse y valores negativos (evaporación es menor a precipitación) corresponden a entradas al embalse.

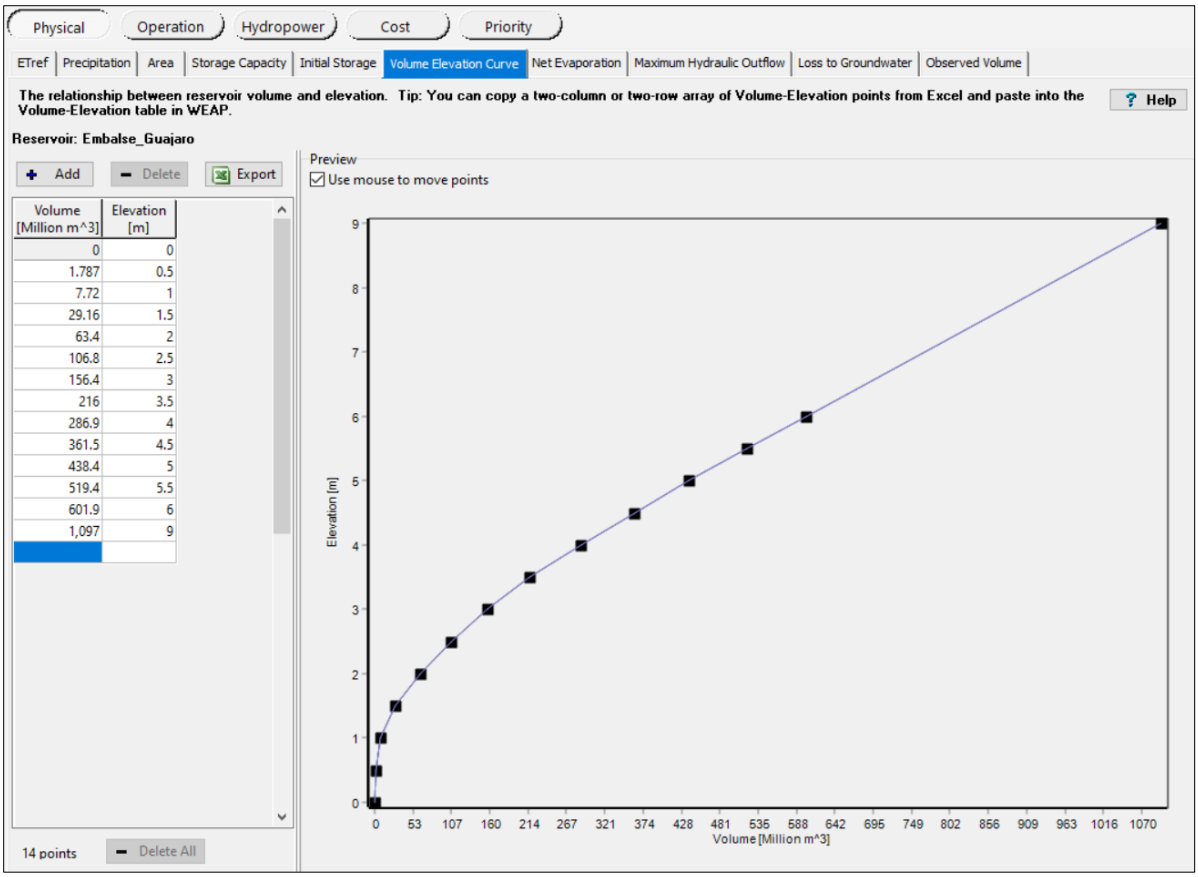


Figura 66. Vista de la pestaña de datos para la curva volumen – elevación del elemento embalse que representa el embalse El Guájaro en WEAP.
Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la regla de operación de las compuertas del embalse El Guájaro, debido a la complejidad de esta, se optó por externalizar los flujos de entrada y salida al embalse. Esto es, no representar las restricciones dentro de la caracterización del embalse, sino que representar las entradas y salidas mediante sitios de demanda. Adicionalmente, solo se implementó la regla de operación para año promedio.

Los sitios de demanda, además de representar requerimientos de agua para uso de agua potable o riego, son una herramienta flexible de WEAP que permite distribuir agua entre diversos elementos. Un caso particular de distribución es cuando a un sitio de demanda se le asigna una demanda de, por ejemplo, 10 m^3/día desde un río A, consumo 0% y un retorno a un río B. En este caso, de haber suficiente disponibilidad de agua en el río A, el sitio de demanda tomará desde el río A la cantidad de agua demandada y la retornará al río B, resultando en un trasvase de 10 m^3/s desde el río A al río B.

Para representar la regla de operación, se incorporaron 3 sitios de demanda para representar la salida neta de agua en enero, entre mayo y julio y en agosto, según la regla de operación presentada en la sección 3.2.1. Estos sitios de demanda fueron codificados como *Compuertas_Salida_Enero*, *Compuertas_SalidaMayJunJul* y *Compuertas_Salida_Agosto*, respectivamente. Estos sitios de demanda se activan únicamente para los respectivos meses y la demanda está restringida al mínimo entre a) un caudal máximo de 200 m^3/s (que responde a la capacidad máxima de ambas compuertas según el informe de CRA (2012)) o b) la lámina de agua por sobre el umbral que indica la regla de operación. Estos umbrales corresponden a 4.0, 4.5 y 4.2 m.s.n.m o 3.45, 3.95 y 3.65 m desde el fondo del mar para *Compuertas_Salida_Enero*, *Compuertas_Salida_MayJunJul* y

Compuertas_Salida_Agosto, respectivamente. En la realidad estos caudales de salida desembocan en el canal del Dique; sin embargo, este cuerpo de agua no fue representado en el modelo ERA-CRA, por lo que se considera un consumo de 100% en el sitio de demanda para representar el flujo como una salida del sistema.

Por otro lado, se incorporaron 2 sitios de demanda para representar la entrada neta de agua entre mayo y julio y en octubre, según la regla de operación presentada en la sección 3.2.1. Estos sitios de demanda fueron codificados como *Compuertas_Entrada_MayJunJul* y *Compuertas_Entrada_Octubre*, respectivamente. Estos sitios de demanda se activan únicamente para los respectivos meses y la demanda está restringida al mínimo entre a) un caudal máximo de 200 m^3/s (que responde a la capacidad máxima de ambas compuertas según el informe de CRA (2012)) o b) la lámina de agua por debajo del umbral que indica la regla de operación. Estos umbrales corresponden a 4.5 y 4.8 m.s.n.m o 3.95 y 4.25 m desde el fondo del mar para *Compuertas_Entrada_MayJunJul* y *Compuertas_Entrada_Octubre*, respectivamente. En la realidad estos caudales de entrada provienen del canal del Dique; sin embargo, este cuerpo de agua no fue representado en el modelo ERA-CRA. Una solución a esto es incorporar un elemento otros suministros que tiene la capacidad de incorporar flujos desde fuera del sistema. De esta forma, se construye la estructura de trasvase anteriormente mencionada como otro suministro – conducción - sitio de demanda – flujo de retorno – embalse, considerando un consumo de 0% en el sitio de demanda.

La estructura de elementos WEAP para representar la regla de operación del embalse El Guájaro se presenta en la Figura 67.

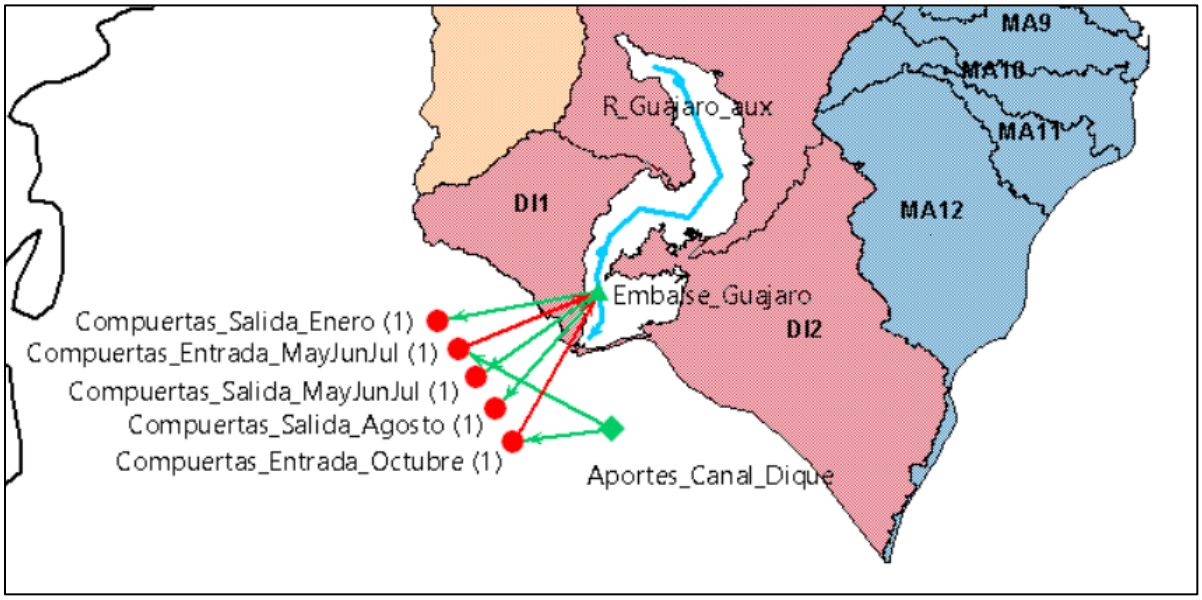


Figura 67. Vista esquemática de la representación de las compuertas y regla de operación del embalse El Guájaro en WEAP. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la conceptualización del embalse y su regla de operación, esta considera que las condiciones entre el embalse el Guájaro y el canal del Dique siempre permiten la ocurrencia de los flujos entre estos cuerpos de agua. A escala diaria es probable que nunca se pueda cumplir a cabalidad la regla debido a las restricciones socio-ecológicas; sin embargo, se podría esperar que a escala mensual los umbrales objetivo se puedan cumplir. Es por esto que los resultados en torno al comportamiento del embalse el Guájaro deben considerarse como referenciales. Sin embargo, el modelo ERA-CRA será una herramienta de apoyo para analizar distintas reglas de operación y/o

distintas excepciones a las reglas y ver cómo evolucionará el embalse o comparar respecto a un embalse no regulado.

7.3.9. Esquema final en WEAP

A partir de los elementos presentados en esta sección, se presenta en la Figura 68 la vista esquemática resultante en WEAP con todos los elementos. Un aspecto por considerar a esta escala en el modelo es el orden de las conexiones. Todas las demandas extraen agua desde los elementos río aguas debajo de las escorrentías que llegan a estos elementos.

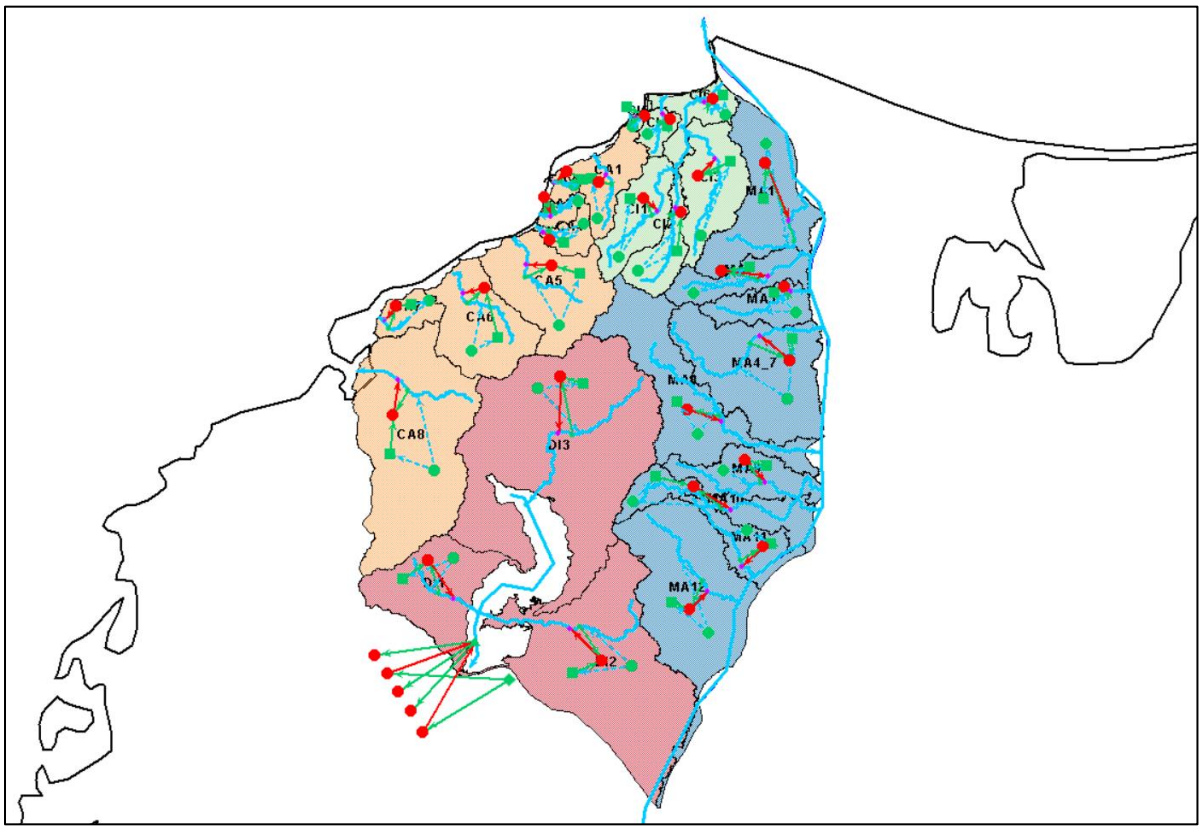


Figura 68. Vista esquemática final del modelo ERA-CRA en WEAP.
Fuente: Elaboración propia.

En total, el modelo se construyó con la siguiente cantidad de elementos:

- Río: 28 elementos
- Embalse: 1 elemento
- Agua subterránea: 26 elementos
- Otras fuentes: 1 elemento
- Sitio de demanda: 31 elementos
- Unidad hidrológica: 26 elementos
- Escorrentía/Infiltración: 52 elementos
- Conducción: 57 elementos
- Flujo de retorno: 28 elementos

7.4. Calibración del modelo WEAP ERA-CRA

Tal como se comentó en la sección 7.3.1, debido a que no hay información de caudales dentro del Departamento del Atlántico, no fue posible realizar una calibración de los parámetros de las unidades hidrológicas de forma directa. En esta sección se presenta la estrategia y proceso de calibración de los parámetros. No se consideró el embalse El Guájaro como referencia para la calibración debido a que los niveles responden a procesos externos, como el control de inundaciones aguas abajo del canal del Dique y el control de procesos migratorio de peces, por lo que replicarlos no es un objetivo del modelo.

Para la calibración del modelo ERA-CRA se priorizó el uso de información ya disponible por el grupo de investigación. El grupo de investigación tiene acceso a un modelo WEAP a escala regional de la cuenca del río Magdalena. Este modelo es una representación general de la hidrología superficial a escala mensual y considera algunos usos de agua a lo largo de la cuenca. Este modelo se aprovechó en términos de la climatología y delimitación de subcuencas.

Una primera posibilidad de calibración de los parámetros del modelo ERA-CRA fue modelar el área entre la estación IDEAM Calamar, aguas arriba del Departamento del Atlántico, y la estación IDEAM Tacamocho que es la estación disponible inmediatamente aguas arriba de la estación Calamar. Sin embargo, al analizar la información de caudales diarios, es posible observar que la diferencia de los caudales medidos en Tacamocho y Calamar oscila entre valores positivos (caudal aguas arriba es mayor que aguas abajo) y negativos (caudal aguas arriba es menor que aguas abajo), lo cual no responde a una dinámica donde solo hay aportes de escorrentía superficial. La diferencia entre los caudales medidos en Tacamocho y Calamar se muestran en la Figura 69.

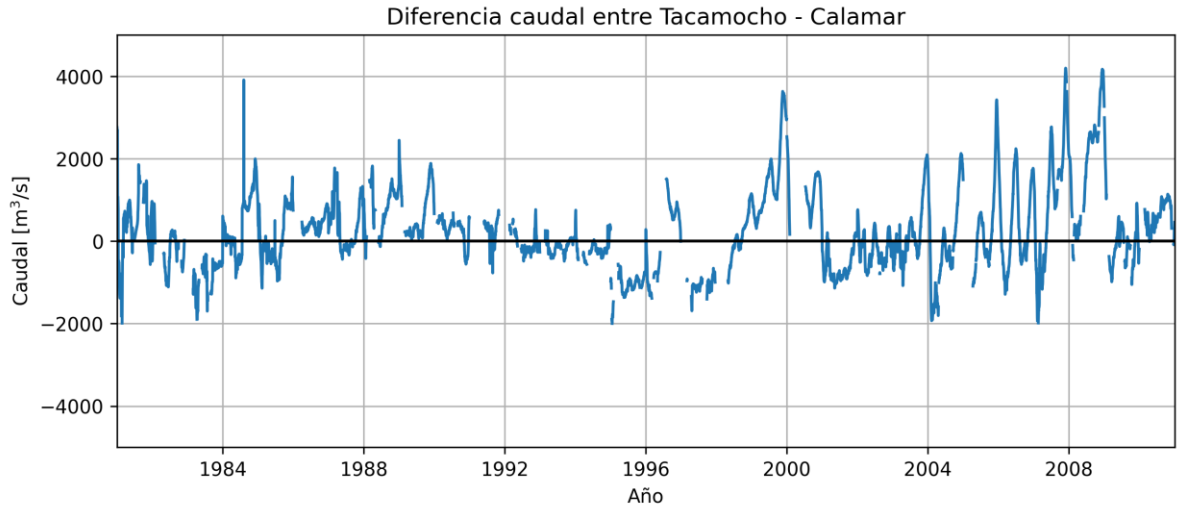


Figura 69. Diferencia entre el caudal diario medido en la estación Tacamocho (aguas arriba) y Calamar (aguas abajo). Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre los caudales medidos en Tacamocho y Calamar puede deberse a una interacción río-acuífero o a una intervención antrópica con extracciones y vertimientos importante. Adicionalmente, al calcular el volumen total de precipitación de la subcuenca delimitada en el modelo WEAP del río Magdalena, este es menor a los valores positivos de la diferencia entre ambas estaciones. Dadas estas condiciones, se descartó esta zona para realizar una calibración y extrapolación de los parámetros.

Una segunda alternativa analizada fueron 4 subcuencas aportantes a la ciénaga de Santa Marta (ver Figura 70) debido a que el modelo WEAP del río Magdalena representa adecuadamente la estacionalidad y curva de duración a escala mensual de las estaciones aguas abajo de estas y porque el caudal medido corresponde directamente al caudal generado en estas subcuencas y no a un caudal aportado por estas. Debido a estas condiciones es que se decidió realizar la calibración en esta zona.

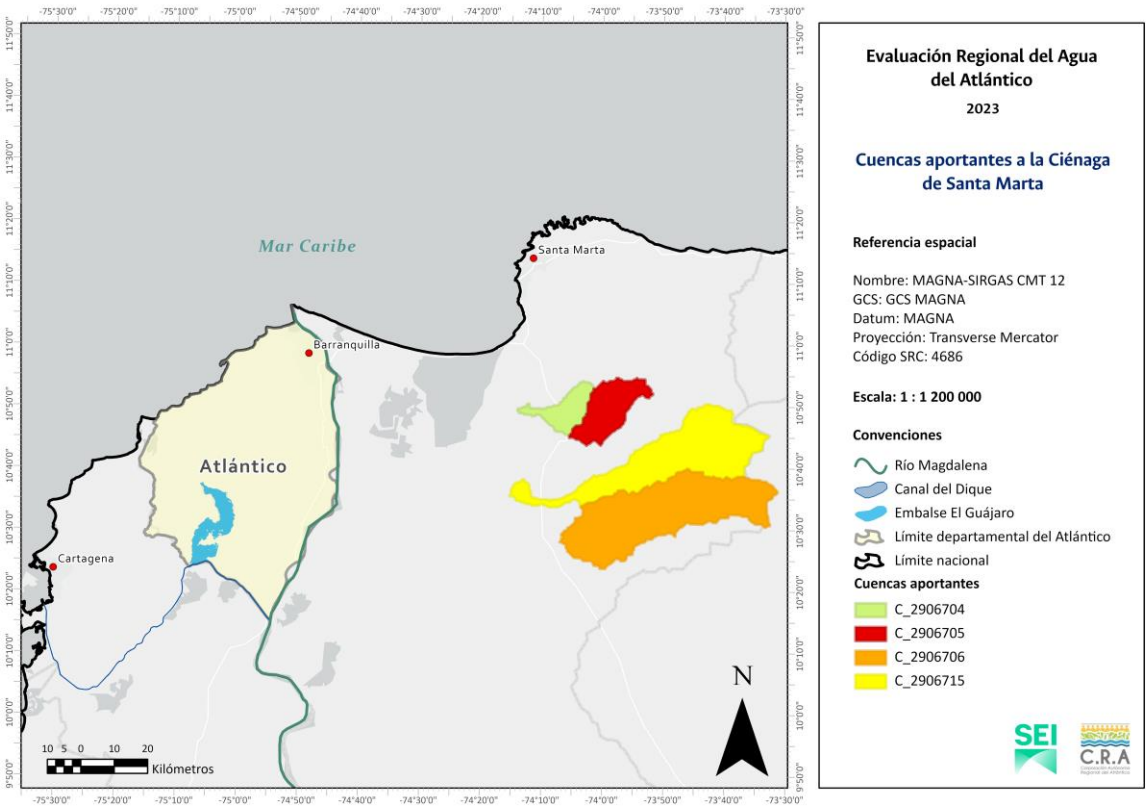


Figura 70. Subcuencas aportantes a la ciénaga de Santa Marta consideradas para la calibración de parámetros del modelo ERA-CRA.
Fuente: Elaboración propia.

Las cuatro subcuencas aportantes se caracterizaron de la misma forma que las subcuencas del Departamento del Atlántico, a excepción del sistema subterráneo, que no se caracterizó y se asumió que toda la subcuenca tiene la capacidad de infiltrar. Sin embargo, se recurrió completamente a información pública. La información utilizada y el procesamiento para implementar en WEAP es la siguiente:

- Delimitación de subcuencas: Se utilizaron los polígonos del modelo WEAP del río Magdalena
- Cobertura y uso de suelo: Se utilizó la información Corine Land Cover elaborada por IDEAM
- Caracterización de suelos: Se utilizó la información de pública en el portal del IGAC de los suelos del Departamento de Magdalena[17]
- Pendientes: Se calculó la pendiente media en base al mapa de elevación digital de resolución de 30 m de la NASA (SRTM)

[17] https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia.

- Humedad relativa: Se utilizó el valor promedio para la subcuenca en el modelo WEAP del río Magdalena (79%)
- Velocidad del viento a 2 m: Se utilizó el valor promedio para la subcuenca en el modelo WEAP del río Magdalena (2 m/s)
- Fracción nubosa: Se utilizó el valor promedio para la subcuenca en el modelo WEAP del río Magdalena (0.68)
- Precipitación: Se utilizó el producto grillado CHIRPS a escala diaria. Se realizó una corrección de sesgo a escala mensual mediante el método de equiprobabilidad (Q-Q) y luego se escaló la información diaria para preservar los valores mensuales.
- Temperatura: Se utilizó el producto grillado ERA5-Land a escala diaria. Se realizó una corrección de sesgo a escala mensual mediante el método de equiprobabilidad (Q-Q) y luego se escaló la información diaria para preservar los valores mensuales.

Posterior a la caracterización de estas subcuencas, se analizó la similitud y diferencias que estas tienen respecto a las condiciones del Departamento del Atlántico. La Tabla 26 muestra una comparación de las pendientes y la elevación media del Departamento del Atlántico y de las subcuencas aportantes a la ciénaga de Santa Marta.

Tabla 26. Presencia de las distintas clasificaciones de pendiente y elevación promedio del terreno en las subcuencas del Departamento del Atlántico y las potenciales subcuencas para la calibración del modelo ERA-CRA.

Pendiente	**2906704**	**2906715**	**2906706**	**2906705**	**CRA**
Moderado	22	8	9	2	35
Suave	18	3	1	0	40
Empinado	5	12	15	10	16
Fuerte	55	77	75	88	10
Elevación (msnm)	462	2709	1443	1912	60

Nota 1: Colores corresponden a las áreas presentadas en la Figura 70.
Nota 2: Los valores asociados a pendientes corresponden al porcentaje del total en el área.
Fuente: Elaboración propia.

Se priorizó la subcuenca aportante a la estación 2906704 debido a que es la que tiene mayor superficie con pendientes suaves y moderadas, pendientes que predominan en el Departamento del Atlántico. En segundo lugar, se priorizó la subcuenca aportante a la estación 2906715 debido a la compatibilidad de los parámetros para cerrar el proceso de calibración. Es importante considerar que en la zona utilizada para calibrar estas subcuencas abarca zonas de alta montaña, donde hay flujos asociados al derretimiento de nieve, además de que las condiciones climáticas son distintas.

El proceso de calibración posterior a la caracterización de las subcuencas consistió en primero calibrar los parámetros de la subcuenca aportante a la estación 2906704 y, luego, actualizar esos parámetros en la subcuenca aportante a la estación 2906715 y calibrar en esta última subcuenca los parámetros faltantes. Este proceso se realizó con información del período 1981 – 2015. Teniendo los parámetros calibrados en las dos subcuencas, estos se replicaron en el modelo ERA-CRA. La Tabla 27 presenta un resumen de los parámetros del método de humedad de suelo calibrados y la Figura 71 y Figura 72 presenta los caudales resultantes de la calibración en las subcuencas aportantes a la estación 2906704 y 2906715, respectivamente. El detalle de los parámetros calibrados se presenta en el Anexo 13.2.

Tabla 27. Resumen de los parámetros del método de humedad de suelo calibrados.

Parámetro método humedad de suelo	Símbolo	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio
Coeficiente de cultivo	K_c	0.32	1.23	0.86
Factor de resistencia a la escorrentía	RRF	2	407	46
Dirección preferencial de flujo	f	0.02	0.86	0.33
Conductividad del primer balde	K_S	1	100	24
Capacidad de almacenamiento del primer balde	S_w	399	1,001	870

Fuente: Elaboración propia.

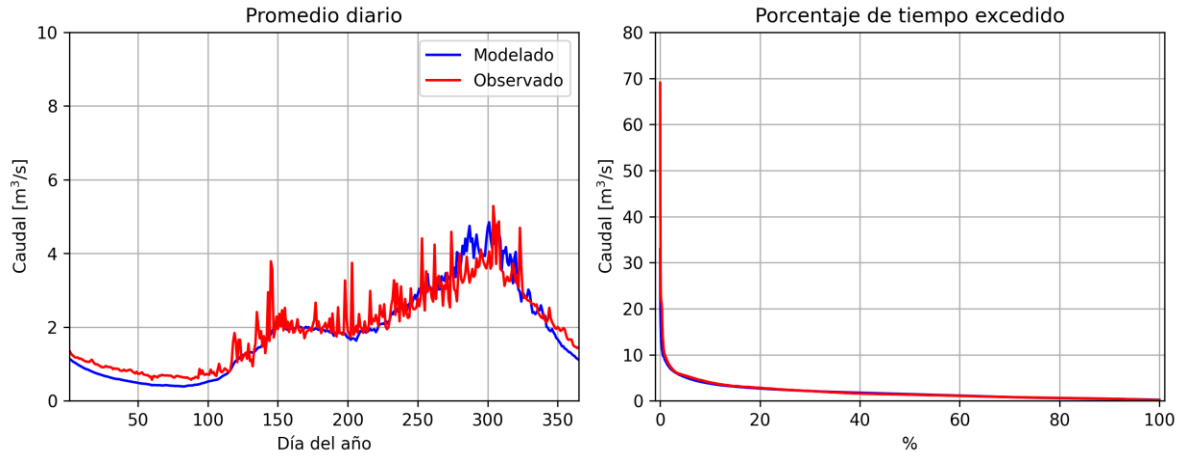


Figura 71. Comparación de los caudales observados y calibrados en la subcuenca aportante a la estación 2906704.
Fuente: Elaboración propia.

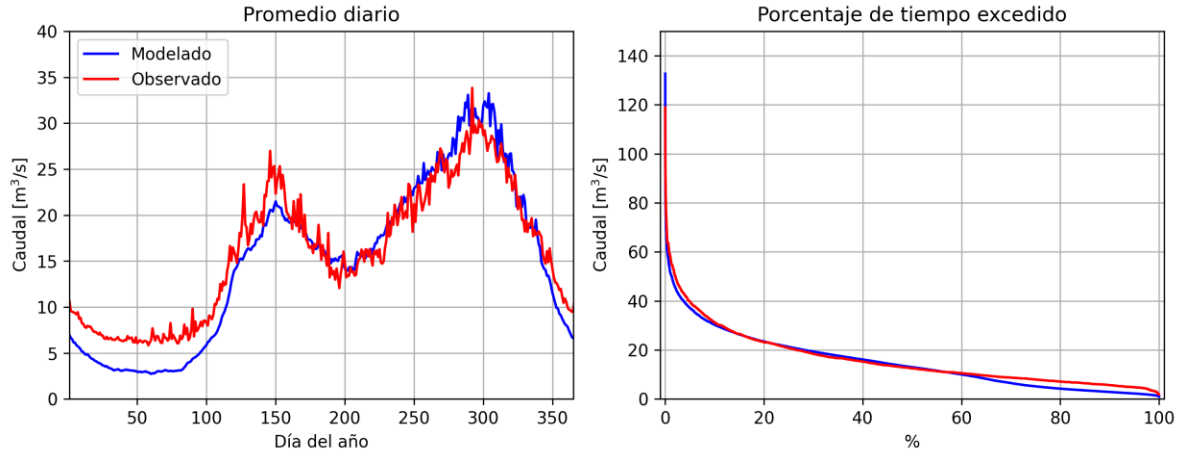


Figura 72. Comparación de los caudales observados y calibrados en la subcuenca aportante a la estación 2906715.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la calibración muestran una buena aproximación de la curva de duración de las observaciones. En términos de la variación estacional, los caudales calibrados muestran una menor reactividad que las observaciones, una subestimación del primer período húmedo y sobreestimación del segundo período húmedo y una subestimación del caudal base. Esto último puede estar asociado a que el modelo desarrollado para la calibración no considera aspectos como el derretimiento de nieve o aportes del sistema subterráneo, en caso de existir. Sin embargo, la calibración permite capturar el comportamiento bimodal de los caudales en ambas estaciones y la relación que hay entre

ambos períodos húmedos. Adicionalmente, en ambas estaciones los estadísticos de calibración de los valores promedios diario resultaron valores dentro de los rangos $0.0 < RSR < 0.5, 0.75 < NSE < 1.00, -10\% < PBIAS < 10\%$, que, según Moriasi et al. (2007), pueden ser considerados como un ajuste muy bueno.

Considerando las limitaciones y objetivos de esta calibración, se consideró como satisfactorios los resultados obtenidos y los valores calibrados se extrapolaron al modelo ERA-CRA. De todos modos, se debe tener en consideración que estos parámetros se calibraron en condiciones distintas a las existentes en el Departamento del Atlántico; sin embargo, el objetivo de este proceso es generar un primer set de parámetros para el desarrollo de una herramienta que sirva no solo para tomar decisiones, sino que también para evidenciar las brechas de información. En un futuro próximo debe priorizarse el levantamiento de información dentro del Departamento para complementar el ajuste de parámetros realizado.

7.5. Resultados del modelo WEAP

En esta sección se presentan los resultados del modelo ERA-CRA con enfoque en el balance hídrico natural del sistema y el embalse El Guájaro en un régimen sin intervención o sin demandas (escenarios Natural histórico, Natural CC 2011-2040 y Natural CC 2041-2070). El objetivo de esta sección es presentar las principales características de los flujos y mostrar las capacidades de la herramienta para futuros análisis de interés de la CRA.

7.5.1. Escenario natural histórico

7.5.1.1. Balance hídrico

En esta subsección se presenta el balance hídrico a escala del Departamento del Atlántico, calculado con el modelo ERA-CRA. La precipitación, evapotranspiración, infiltración al sistema subterráneo y flujos superficiales anuales, calculados para toda el área del Departamento en el período 1993 – 2022, se presenta en la Figura 73 y se resume en la Tabla 28.

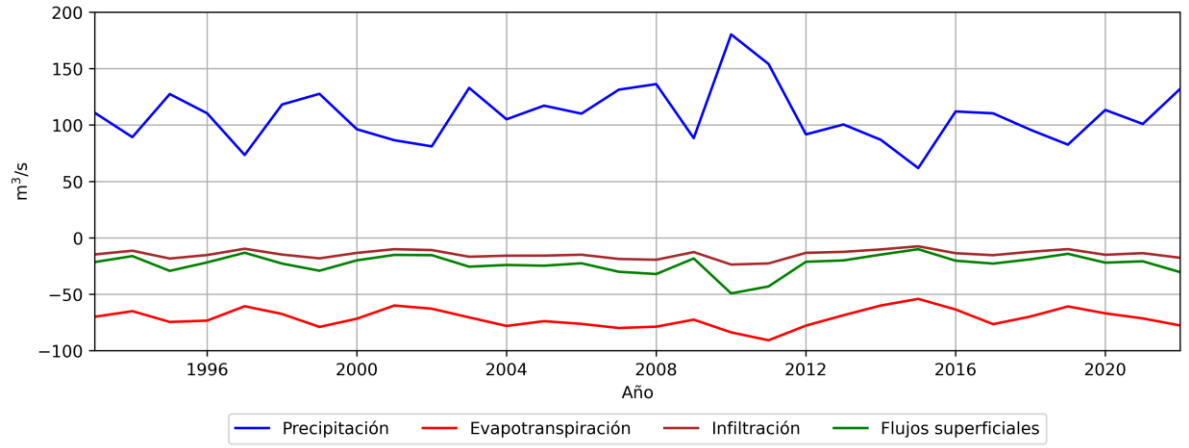


Figura 73. Balance hídrico anual del Departamento del Atlántico en el escenario Natural Histórico, período 1993-2022. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Promedio y desviación estándar de los flujos anuales del balance hídrico del Departamento del Atlántico en el período 1993 – 2022.

Flujo	Promedio	Desviación estándar
Precipitación (m3/s)	108.9	24.8
Evapotranspiración (m3/s)	71.1	8.1
Infiltración (m3/s)	14.5	3.8
Flujos superficiales (m3/s)	22.9	8.3

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del modelo ERA-CRA muestran que los flujos superficiales responden directamente a los cambios en precipitación, lo que se puede ver con claridad entre los años 2008 y 2012, período en que los flujos superficiales disminuyen y aumentan conforme la precipitación disminuye y aumenta. Esta dinámica no siempre se observa directamente en la evapotranspiración ni en la infiltración, donde posterior al evento altas precipitaciones en el año 2010, en lugar de que estas variables disminuyan con la precipitación, estas tienden a aumentar o mantenerse. Esta dinámica diferenciada respecto a los flujos superficiales está asociada a la memoria en la humedad de suelo. Adicionalmente, el balance hídrico muestra que la evapotranspiración, flujos superficiales e infiltración corresponden a un 65, 21 y 13% de la precipitación, respectivamente. El 1% de la precipitación faltante corresponde a incrementos en el almacenamiento en el primer balde o en la humedad del suelo superficial. A modo de comparación, la precipitación promedio anual es alrededor de un 1.5% del caudal promedio anual del río Magdalena.

Para mayor detalle a escala de las subzonas hidrográficas, la Figura 74 muestra el balance hídrico promedio mensual en el período 1993 – 2022 para las 4 subzonas hidrográficas contenidas dentro del Departamento del Atlántico. De forma complementaria, la Tabla 29 presenta los promedios y desviación estándar de los flujos mensuales del balance hídrico de las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 1993 – 2022. La Figura 75, Figura 76 y Figura 77 presentan los valores promedio anual de la evapotranspiración, escorrentía e infiltración, respectivamente, para cada subcuenca.

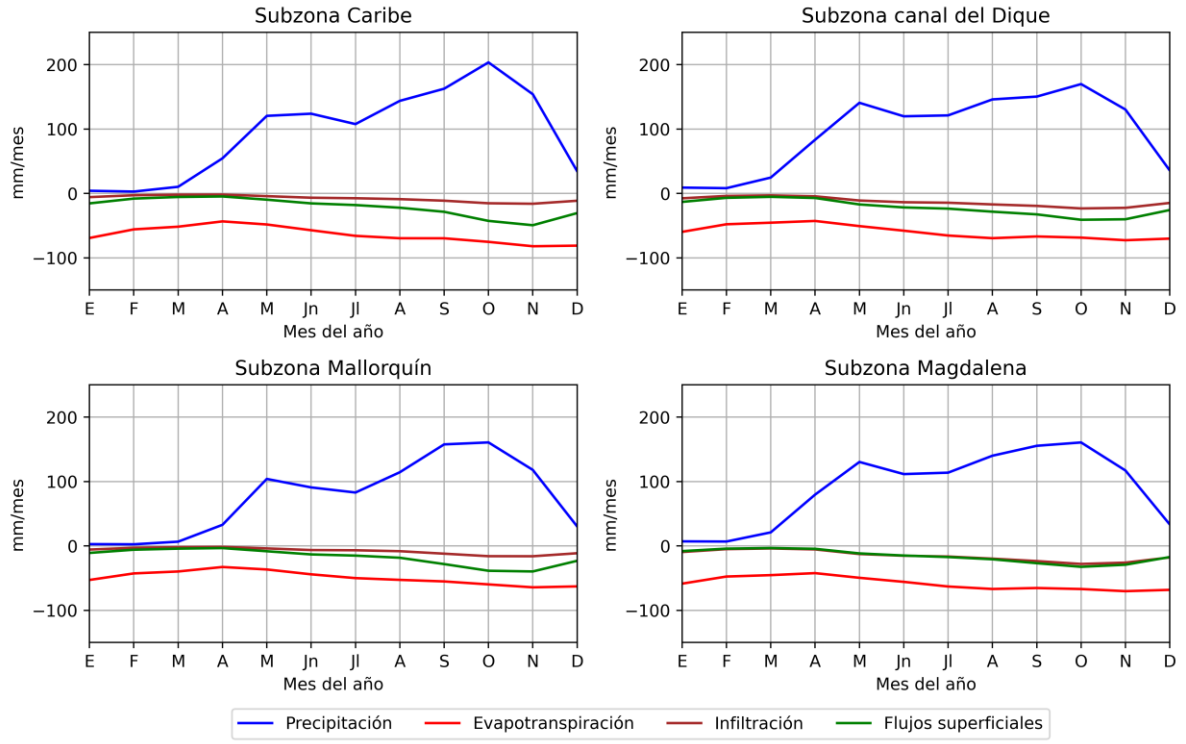


Figura 74. Balance hídrico promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 1993 – 2002.
Fuente: Elaboración propia.

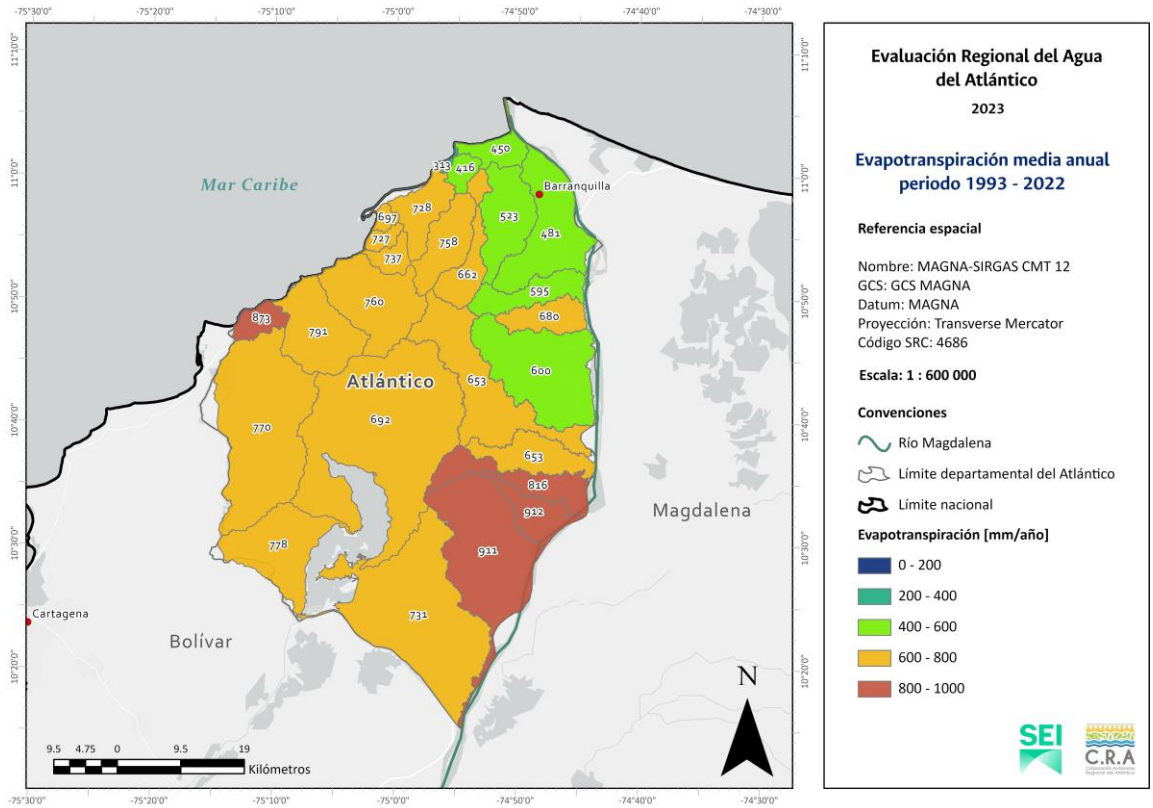


Figura 75. Evapotranspiración promedio multianual en el período 1993 – 2022.
Fuente: Elaboración propia.

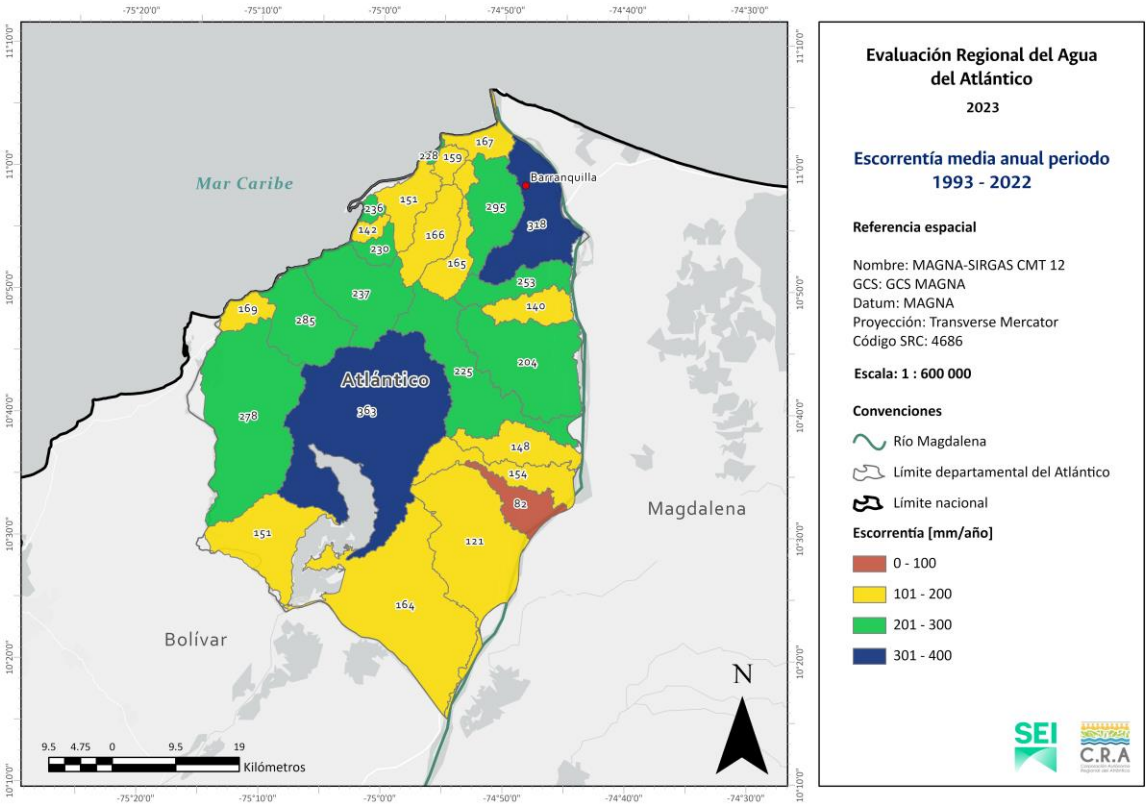


Figura 76. Escorrentía promedio multianual en el período 1993 – 2022.
Fuente: Elaboración propia.

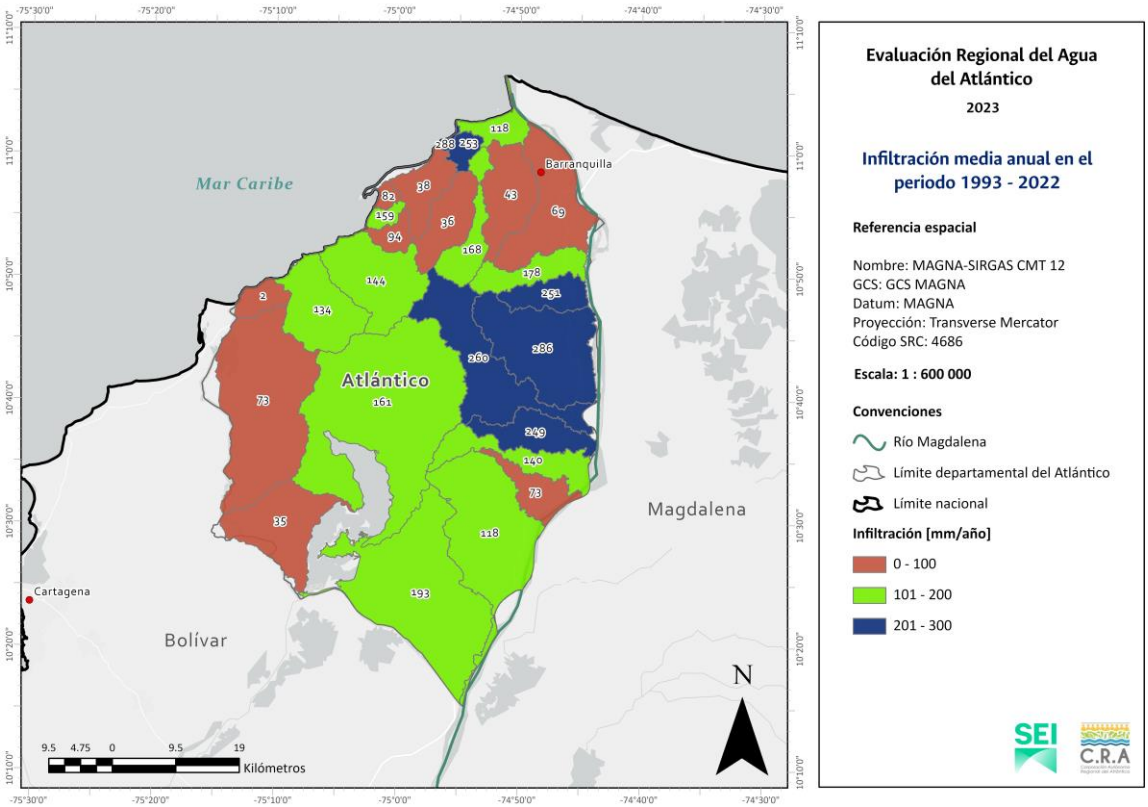


Figura 77. Infiltración promedio multianual en el período 1993 – 2022.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Promedio y desviación estándar de los flujos mensuales del balance hídrico de las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 1993-2022.

Flujos	Caribe	Canal del Dique	Mallorquín	Magdalena
Precipitación [mm/mes]	93.5 (84.4)	94.9 (69.6)	75.3 (73.9)	89.7 (67.8)
Evapotranspiración [mm/mes]	64.1 (17.4)	59.8 (13.2)	49.5 (14.8)	58.3 (12.4)
Infiltración [mm/mes]	7.8 (6.3)	12.9 (8.3)	7.8 (7.1)	15.3 (9.7)
Flujos superficiales [mm/mes]	20.9 (21.6)	21.9 (15.5)	17.4 (19.3)	15.9 (12.5)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la variación estacional muestran que, si bien la precipitación en las 4 subzonas hidrográficas es bimodal, la evapotranspiración, infiltración y flujos superficiales no son bimodales, sino que unimodales. En el caso de los flujos superficiales, en el primero húmedo se observa un aumento en flujo superficial que no disminuye en el segundo período seco producto del flujo subsuperficial asociado a la humedad de suelo. En esta misma línea, se ve la capacidad del modelo de representar la evapotranspiración en los períodos secos producto de la humedad almacenada en el suelo durante los períodos de precipitación. Es importante notar que los resultados muestran que en los períodos de bajas precipitaciones no hay flujos superficiales significativos y que solo se observan flujos superficiales hacia los períodos más húmedos, lo que es consistente con la información cualitativa conversada durante el desarrollo de los talleres de la ERA.

Respecto a los caudales en los cursos de agua superficial representados en WEAP, la Tabla 30 presenta un resumen de los principales estadísticos de la información diaria en el período 1993 – 2022.

Tabla 30. Resumen de los caudales diarios simulados en los elementos ríos de WEAP en el período 1993 – 2022.

Río	Promedio [m^3/s]	Desviación estándar [m^3/s]	Percentil 25% [m^3/s]	Percentil 50% [m^3/s]	Percentil 75% [m^3/s]	Mínimo anual [m^3/s][1]	Máximo anual [m^3/s][2]
R_CA1	0.30	0.92	0.08	0.15	0.30	0.05	4.16
R_CA2	0.08	0.16	0.02	0.04	0.09	0.01	0.79
R_CA3	0.06	0.13	0.02	0.04	0.07	0.01	0.53
R_CA4	0.18	0.25	0.06	0.12	0.22	0.03	1.13
R_CA5	1.09	1.59	0.33	0.72	1.34	0.15	9.83
R_CA6	1.11	1.67	0.36	0.68	1.25	0.16	8.68
R_CA7	0.17	0.33	0.06	0.11	0.19	0.04	1.28
R_CA8	2.83	2.80	1.09	2.13	3.58	0.55	11.27
R_CI1	0.41	0.68	0.14	0.26	0.47	0.08	2.88
R_CI2	1.86	2.51	0.59	1.18	2.21	0.30	13.97
R_CI3	0.94	1.34	0.26	0.55	1.08	0.13	8.53
R_CI4	0.10	0.12	0.03	0.06	0.13	0.01	0.46
R_CI5	0.03	0.05	0.00	0.01	0.03	0.00	0.27
R_CI6	0.19	0.39	0.04	0.09	0.19	0.02	1.99
R_DI1	0.65	0.53	0.28	0.54	0.86	0.14	2.58
R_DI2	1.85	1.21	0.85	1.65	2.53	0.39	5.64
R_DI3	5.75	4.62	2.35	4.87	7.74	0.98	19.51
R_MA1	1.54	3.19	0.32	0.69	1.41	0.16	26.85
R_MA2	0.51	0.51	0.15	0.36	0.68	0.06	2.94
R_MA3	0.23	0.20	0.09	0.18	0.31	0.04	1.09
R_MA4_7	1.33	1.11	0.46	1.09	1.84	0.16	5.68
R_MA8	1.34	0.99	0.54	1.17	1.88	0.21	4.51
R_MA9	0.36	0.30	0.13	0.30	0.49	0.04	1.35
R_MA10	0.41	0.31	0.19	0.34	0.56	0.08	1.78
R_MA11	0.14	0.11	0.06	0.12	0.20	0.03	0.57

Río	Promedio [m³/s]	Desviación estándar [m³/s]	Percentil 25% [m³/s]	Percentil 50% [m³/s]	Percentil 75% [m³/s]	Mínimo anual [m³/s][1]	Máximo anual [m³/s][2]
R_MA12	0.96	0.72	0.44	0.80	1.31	0.21	3.81

[1]: Corresponde al promedio multianual del mínimo caudal diario cada año.

[2]: Corresponde al promedio multianual del máximo caudal diario cada año.

Fuente: Elaboración propia.

A lo largo del Departamento del Atlántico, los caudales promedio toman valores entre 0.03 y 5.75 m³/s, con un promedio de 0.94 m³/s. El coeficiente de variación de estos cauces superficiales muestra diversas condiciones a lo largo del Departamento del Atlántico, con un valor mínimo de 0.65, máximo de 3.03 y promedio de 1.33. En particular, para las subzonas hidrográficas el coeficiente de variación promedio es de 0.76, 0.96, 1.54 y 1.82 para la subzona hidrográfica Canal del Dique, Magdalena, Mallorquín y Caribe, respectivamente. En cuanto a caudales máximos diarios, los ríos R_CA5, R_CI2, R_DI3 y R_MA1 son los que presentan mayores caudales máximos dentro de sus respectivas subzonas hidrográficas, con caudales de 9.83, 13.97, 19.51 y 26.87 m³/s, respectivamente. Para los ríos R_CA5 y R_DI3, estos valores están asociados directamente al área aportante a estos ríos; sin embargo, para los ríos R_CI2 y R_MA1 esta relación no ocurre.

Respecto a la recarga a los sistemas acuíferos, estos resultados no se obtienen directamente del modelo ERA_CRA, sino que se debe realizar una redistribución de la infiltración en base al área de traslape de los sistemas acuíferos en cada unidad hidrológica. La Figura 78 muestra la infiltración o recarga anual y estacionalidad mensual para cada sistema acuífero del Departamento del Atlántico en el período 1993-2022. Complementariamente, la Tabla 31 muestra el promedio y desviación estándar de la recarga anual de cada sistema acuífero.

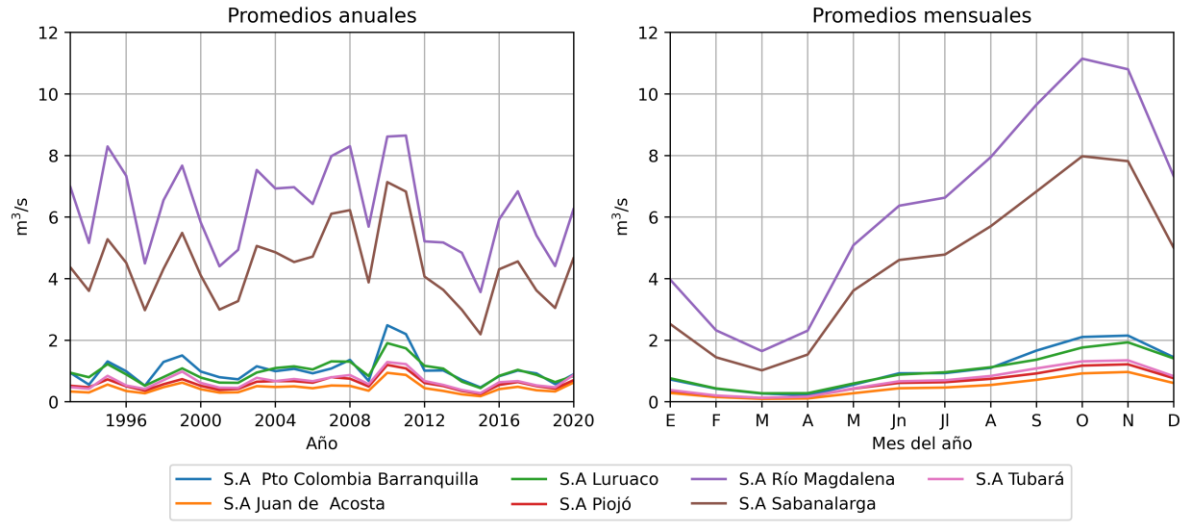


Figura 78. (Izquierda) Recarga anual y (derecha) recarga promedio mensual a cada uno de los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico en el período 1993 – 2022.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Promedio y desviación estándar de la recarga anual a los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico en el período 1993 – 2022.

Sistema acuífero	Promedio [m³/s]	Desviación estándar [m³/s]
Puerto Colombia – Barranquilla	1.05	0.95
Juan de Acosta	0.47	0.41

Sistema acuífero	Promedio [m^3/s]	Desviación estándar [m^3/s]
Luruaco	0.99	0.73
Piojó	0.62	0.49
Río Magdalena	6.29	4.03
Sabanalarga	4.42	3.05
Tubará	0.68	0.57

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de recarga a los sistemas acuífero del Departamento del Atlántico muestra valores promedios entre 0.6 y 6.3 m^3/s, con una variación interanual que responde a las precipitaciones y a la memoria asociada a la humedad del suelo, la cual también se puede observar en la variación estacional. En particular, los sistemas acuíferos Río Magdalena y Sabanalaraga son los que reciben una mayor recarga debido a su extensión. Por otro lado, es importante mencionar que, si bien las concesiones de aguas subterráneas (1.1 m^3/s, ver sección 5) son alrededor de un 8% de la recarga total en el Departamento del Atlántico (14.5 m^3/s, a partir de los resultados del modelo ERA-CRA), al momento de analizar futuras concesiones o renovaciones, se debe analizar el impacto que estas pueden tener a escala local y basar la cuantificación de la oferta en base a algún percentil y no en base al promedio para evitar potenciales afectaciones a los sistemas acuíferos y ecosistemas que se sostienen en ellos.

7.5.1.2. Embalse El Guájaro

En cuanto al embalse El Guájaro, se presenta a continuación los resultados del modelo ERA-CRA considerando un escenario con la regla de operación presentada en la sección 3.2.1 y un escenario considerando únicamente el uso de las compuertas para reiniciar el año con un nivel de 4 m.s.n.m (3.45 m de altura de agua desde el punto más bajo del embalse). Los resultados para el período 1993 – 2022 se presentan en la Figura 79.

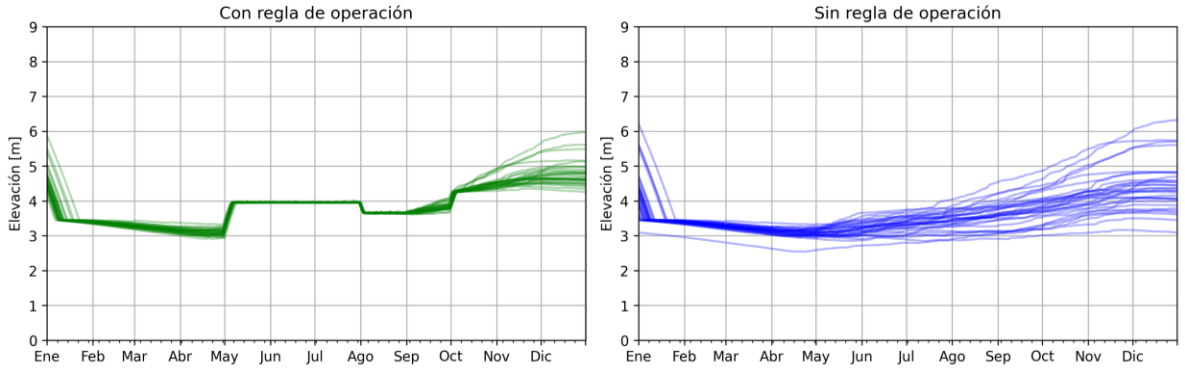


Figura 79. Niveles simulados en el período 1993 – 2022 para el embalse El Guájaro con y sin la regla de operación establecida en el estudio del embalse El Guájaro.
Nota: En el escenario sin regla de operación se consideró el uso de la compuerta en enero para reiniciar los niveles y evitar divergencia de los niveles a condiciones irreales.
Fuente: Resultados de WEAP.

Los resultados de niveles del embalse El Guájaro sin regla de operación muestran cambios dentro del orden de magnitud de las observaciones. Un ejemplo de esto es la condición de niveles en el año 2010, 2011 y 2022, donde las observaciones muestran niveles de alrededor 6 m. Las diferencias entre la dinámica de las observaciones y los resultados del modelo ERA-CRA pueden estar asociadas a la

representación de la evaporación neta (diferencia entre evaporación y precipitación) y a los aportes superficiales desde las subcuencas aportantes. Otro aspecto relevante es la potencial interacción superficial-subterránea que no es representada en el modelo ERA-CRA.

7.5.2. Proyecciones futuras del escenario natural

7.5.2.1. Balance hídrico

En esta subsección se presenta de forma sintética los principales cambios asociados a las condiciones climáticas proyectadas en el modelo ERA-CRA. La precipitación, evapotranspiración, infiltración al sistema subterráneo y flujos superficiales anuales, calculados para toda el área del Departamento en el período 1993 – 2070, se presenta en la Figura 80. Los cambios proyectados de estas variables a los períodos 2011 - 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993-2022, se presentan en la Tabla 32.

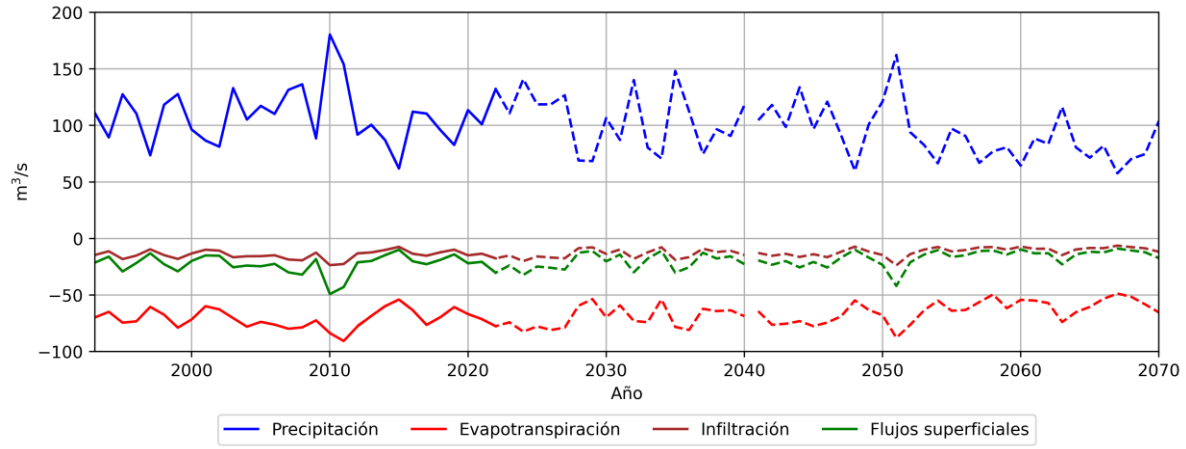


Figura 80. Balance hídrico anual del Departamento del Atlántico en el escenario Natural histórico y futuros, período 1993 – 2070.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Cambios proyectados de los flujos anuales del balance hídrico del Departamento del Atlántico para los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022.

Flujo	2011-2040	2041-2070
Precipitación (%)	-4.5	-15.6
Evapotranspiración (%)	-2.7	-10.2
Infiltración (%)	-7.0	-22.6
Flujos superficiales (%)	-8.8	-26.8

Fuente: Elaboración propia.

Las proyecciones futuras del balance hídrico anual muestran que los cambios porcentuales no se distribuyen de forma equitativa entre los distintos flujos, sino que los flujos superficiales se ven más afectados que, por ejemplo, la evapotranspiración. En base a los dos períodos analizados, cuando hay una disminución en precipitaciones, junto a un aumento en temperaturas, la disminución porcentual de la evapotranspiración es menor a la de la precipitación y la disminución tanto de la infiltración como de los flujos superficiales es mayor que la de las precipitaciones. Esta dinámica es consecuencia de que un aumento en temperaturas implica un aumento en la capacidad de retener humedad por parte de la atmósfera, resultando en una compensación en la evapotranspiración al déficit de

precipitaciones. A modo general, la disminución de la evapotranspiración, infiltración y flujos superficiales es de un 65, 150 y 185% la disminución de la precipitación.

Para mayor detalle de los cambios proyectados a escala de las subzonas hidrográficas dentro del Departamento del Atlántico, la Figura 81, Figura 82, Figura 83 y Figura 84 presentan la precipitación, evapotranspiración, infiltración y flujos superficiales, respectivamente, en términos del promedio mensual de los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070. La Figura 85, Figura 86 y Figura 87 presentan los cambios proyectados de evapotranspiración, escorrentía e infiltración, respectivamente, para cada subcuenca. De forma complementaria, la Tabla 33y Tabla 34 presentan los cambios promedio de los flujos anuales del balance hídrico de las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022.

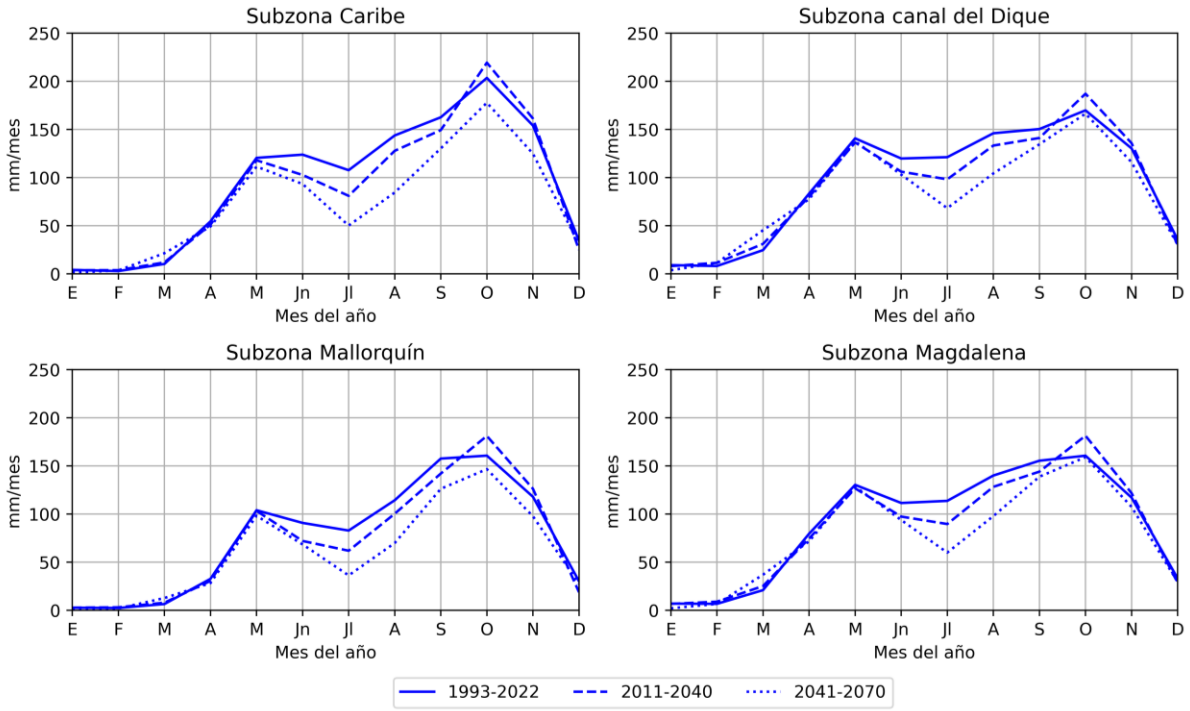


Figura 81. Precipitación promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070.
Fuente: Elaboración propia.

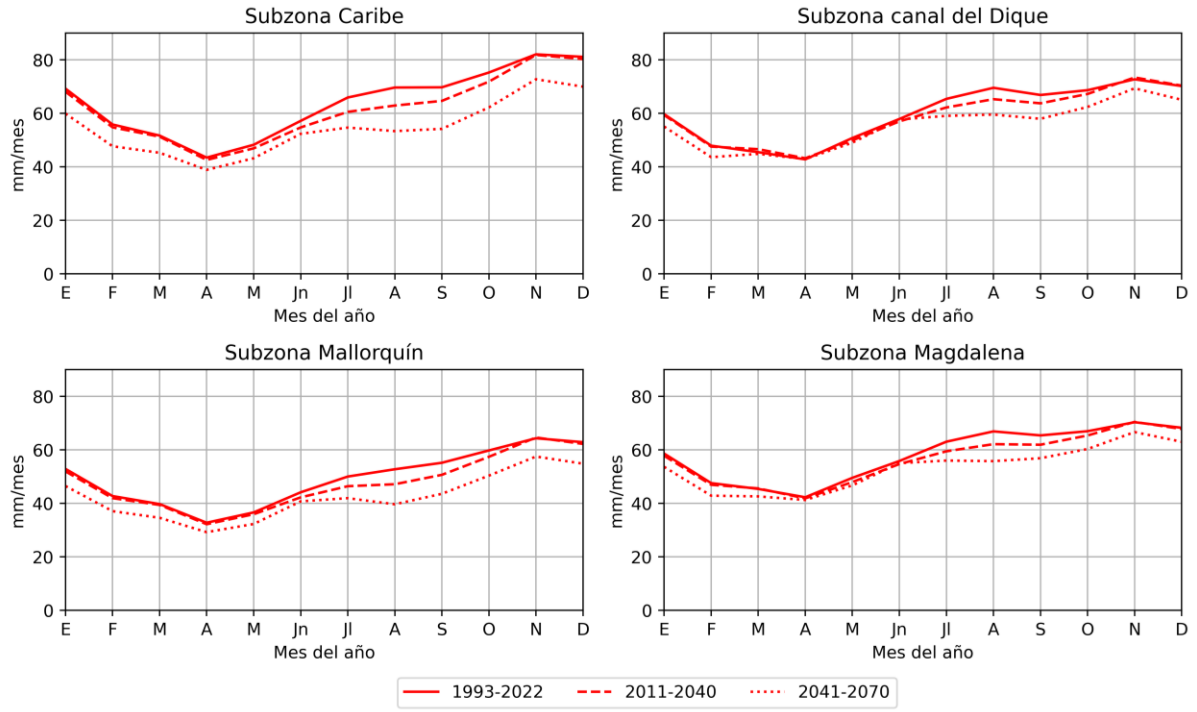


Figura 82. Evapotranspiración promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070.
Fuente: Elaboración propia.

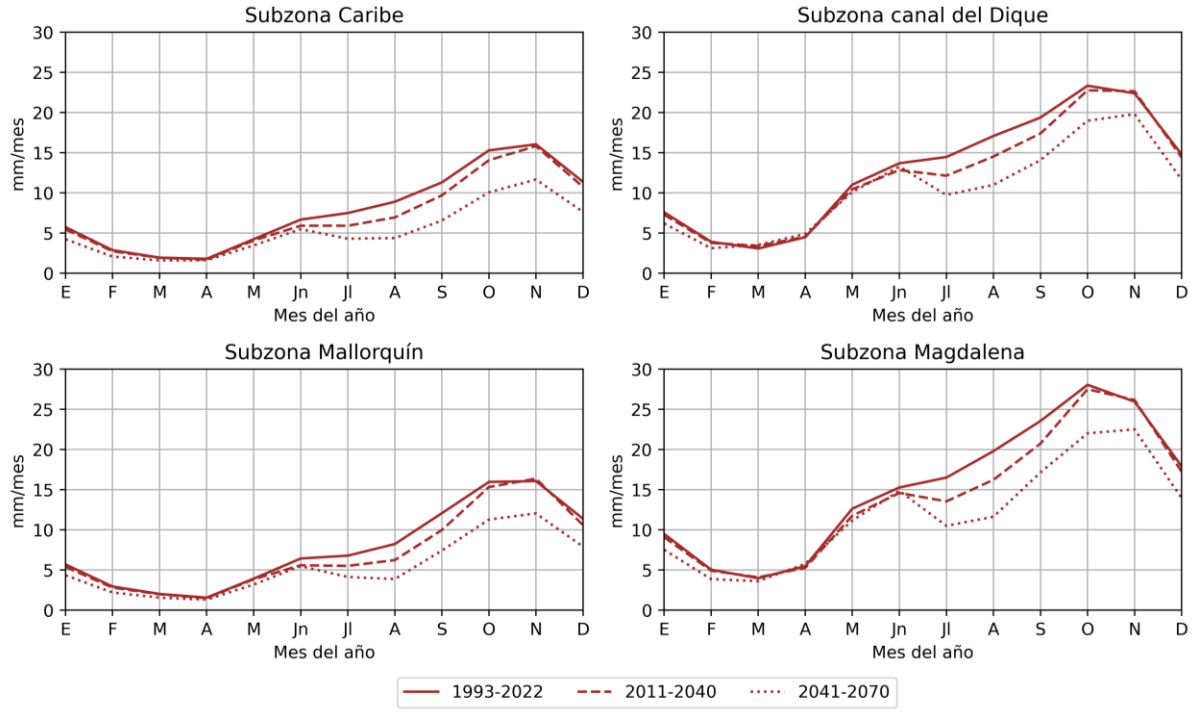


Figura 83. Infiltración promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070.
Fuente: Elaboración propia.

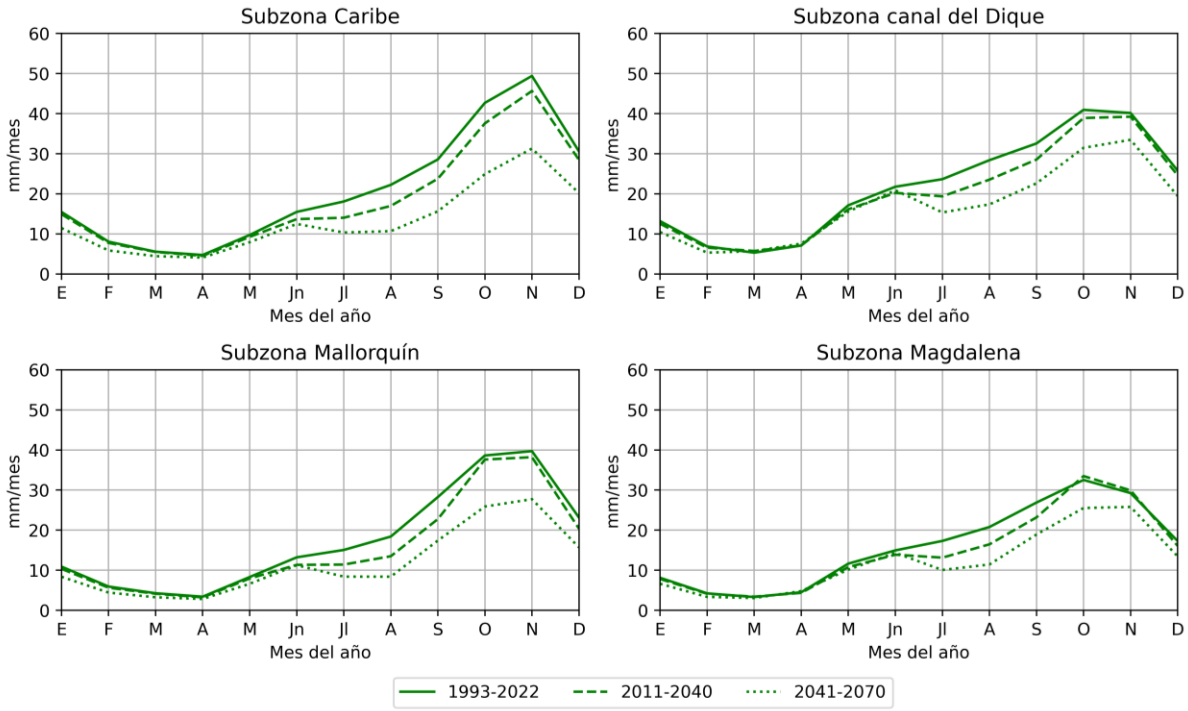


Figura 84. Flujos superficiales promedio mensual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070.
Fuente: Elaboración propia.

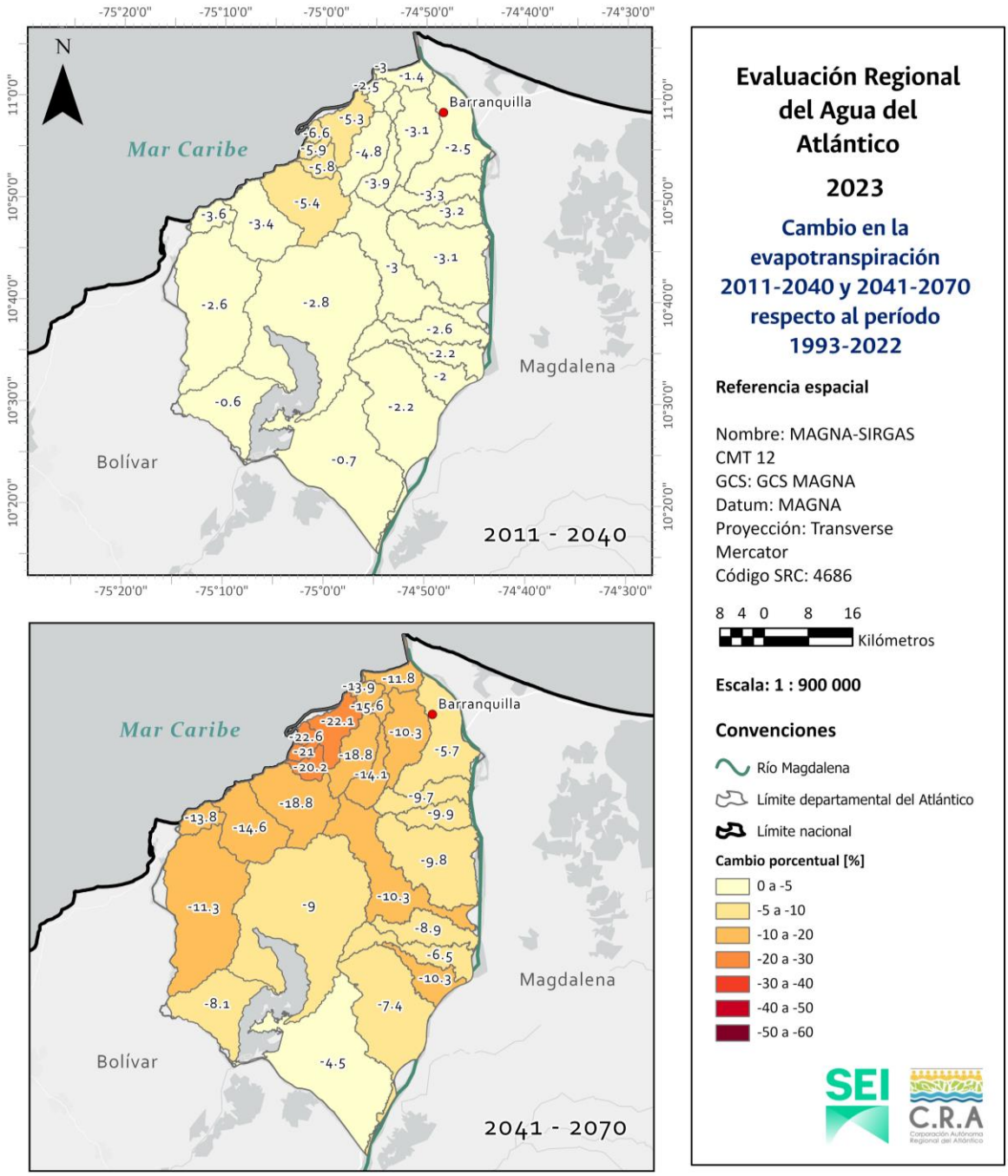


Figura 85. Cambios porcentuales en la evapotranspiración en los periodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070 con respecto al periodo 1993 – 2022.
Fuente: Elaboración propia.

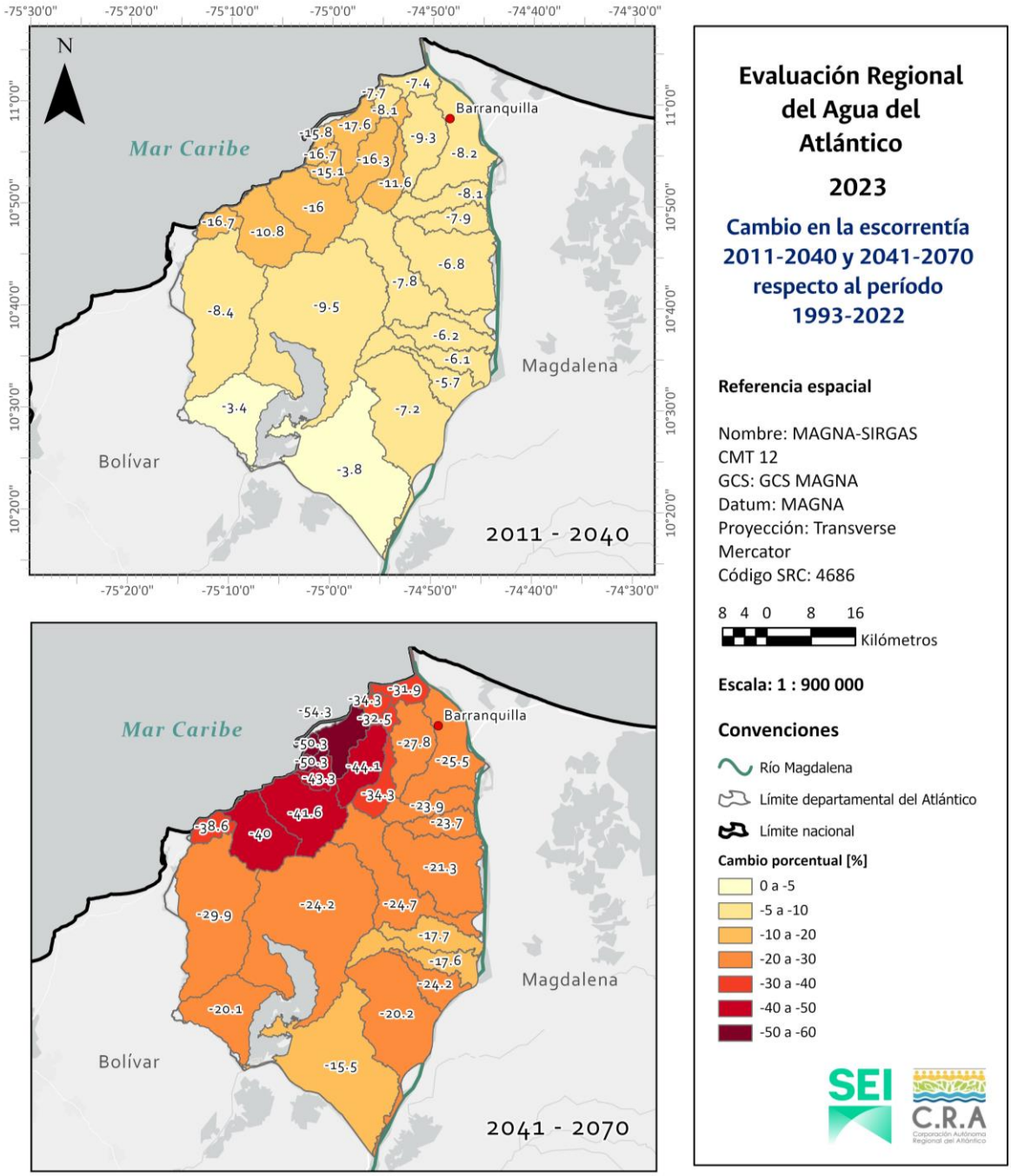


Figura 86. Cambios porcentuales en la escorrentía en los periodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070 con respecto al periodo 1993 – 2022.

Fuente: Elaboración propia.

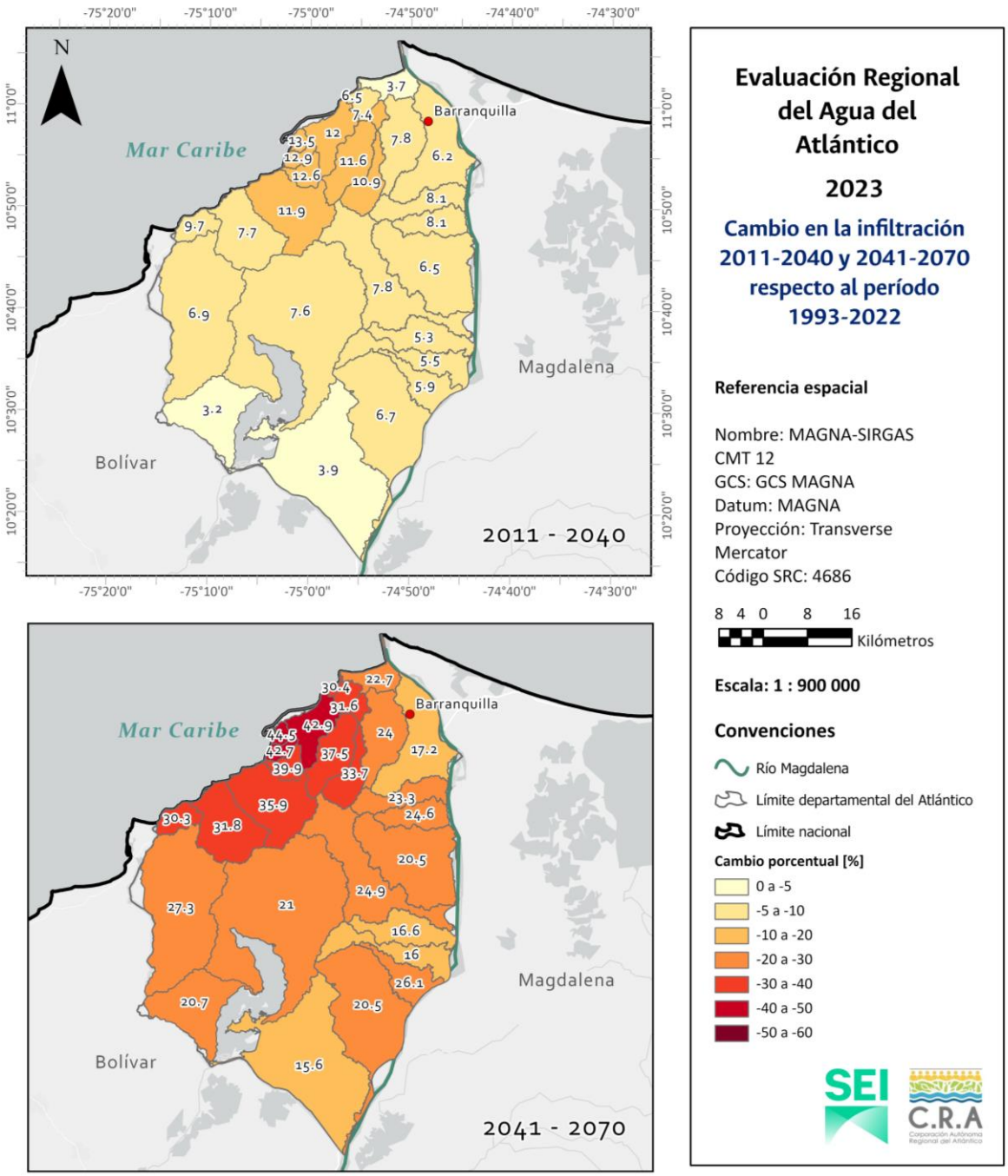


Figura 87. Cambios porcentuales en la infiltración en los periodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070 con respecto al periodo 1993 – 2022.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Cambios proyectados en las componentes del balance hídrico anual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 2011 – 2040, respecto al período 1993 – 2022.

Flujo	Caribe	Canal del Dique	Mallorquín	Magdalena
Precipitación (%)	-6.0	-3.6	-5.8	-4.0
Evapotranspiración (%)	-3.8	-1.7	-3.6	-2.6
Infiltración (%)	-9.3	-5.8	-8.6	-6.8
Flujos superficiales (%)	-11.4	-7.7	-10.9	-7.4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Cambios proyectados en las componentes del balance hídrico anual en las subzonas hidrográficas del Departamento del Atlántico en el período 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022.

Flujo	Caribe	Canal del Dique	Mallorquín	Magdalena
Precipitación (%)	-21.7	-12.4	-20.8	-13.3
Evapotranspiración (%)	-14.9	-7.2	-14.4	-8.5
Infiltración (%)	-32.7	-18.6	-30.4	-21.3
Flujos superficiales (%)	-36.4	-21.9	-32.9	-22.7

Fuente: Elaboración propia.

Las proyecciones del escenario analizado muestran que los principales cambios en precipitación ocurren entre junio y octubre. En el caso de la evapotranspiración, se observan cambios para todas las épocas del año; sin embargo, en el sector del canal del Dique y río Magdalena no se observan cambios significativos entre marzo y junio. En el caso de la infiltración y flujos superficiales, el período donde se observan mayores cambios es entre julio y diciembre (dos meses de desfase respecto a la precipitación). En cuanto a los cambios porcentuales, se observan cambios proyectados similares para la subzona hidrográfica Caribe y Mallorquín y las subzonas hidrográficas Canal del Dique y Magdalena. Adicionalmente, se mantiene la tendencia general donde las disminuciones en infiltración y flujos superficiales son mayores a la disminución en precipitación; caso contrario con la evapotranspiración, donde la disminución es menor a la disminución en precipitación.

Respecto a los caudales en los cursos de agua superficial representados en WEAP, la Tabla 35 y Tabla 36 presentan los cambios en los principales estadísticos de la información diaria en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022.

Tabla 35. Cambios proyectados para los caudales diarios simulados en los elementos ríos de WEAP en el período 2011 – 2040, respecto al período 1993 – 2022.

Río	Promedio [%]	Desviación estándar [%]	Percentil 25% [%]	Percentil 50% [%]	Percentil 75% [%]	Mínimo anual [%][1]	Máximo anual [%][2]
R_CA1	-17.6	-19.3	-13.2	-16.5	-12.5	-11.4	-20.5
R_CA2	-15.8	-12.4	-16.6	-20.1	-14.7	-12.6	-16.0
R_CA3	-16.7	-16.0	-15.5	-18.6	-14.4	-12.1	-15.7
R_CA4	-15.1	-19.9	-16.3	-14.2	-11.7	-12.9	-16.7
R_CA5	-16.0	-31.3	-16.4	-15.0	-10.6	-11.8	-37.1
R_CA6	-10.8	-16.5	-15.8	-10.2	-5.4	-9.8	-16.2
R_CA7	-16.6	-43.7	-11.8	-9.0	-7.8	-11.0	-35.2
R_CA8	-8.4	-13.5	-9.9	-13.2	-5.4	-4.5	-4.8
R_CI1	-16.3	-33.2	-13.3	-13.2	-10.8	-11.6	-27.0
R_CI2	-11.0	-19.8	-11.7	-11.4	-8.1	-9.7	-10.7
R_CI3	-9.3	-11.8	-10.5	-10.7	-7.6	-7.6	-5.0
R_CI4	-8.1	-13.6	-9.8	-8.1	-7.3	-8.3	-4.8
R_CI5	-7.7	-10.5	-7.6	-9.2	-8.7	-3.9	-1.6
R_CI6	-7.4	-14.9	-6.8	-7.2	-0.5	-7.0	5.7
R_DI1	-3.4	-3.9	-4.2	-8.0	-3.5	1.2	-2.0
R_DI2	-3.8	-0.1	-5.5	-6.5	-3.1	-2.8	3.1
R_DI3	-9.5	-14.2	-9.3	-11.4	-6.9	-4.0	-12.4
R_MA1	-8.2	-3.4	-8.5	-8.4	-8.7	-6.9	-1.7
R_MA2	-8.1	-6.8	-11.8	-10.3	-9.1	-8.7	1.0
R_MA3	-7.9	-7.8	-11.8	-10.2	-7.9	-8.2	-2.1
R_MA4_7	-6.8	-3.3	-12.8	-10.9	-6.3	-3.5	-1.7
R_MA8	-7.8	-5.7	-11.9	-11.4	-7.8	-2.9	-2.5
R_MA9	-6.2	-6.5	-13.5	-9.7	-3.7	-4.2	-8.6

Río	Promedio [%]	Desviación estándar [%]	Percentil 25% [%]	Percentil 50% [%]	Percentil 75% [%]	Mínimo anual [%][1]	Máximo anual [%][2]
R_MA10	-6.1	-1.4	-8.8	-7.8	-8.2	-2.4	2.9
R_MA11	-5.7	-2.8	-9.1	-7.0	-7.4	-1.4	-6.8
R_MA12	-7.1	-6.4	-8.9	-9.1	-7.7	-1.2	-12.3

[1]: Corresponde al promedio multianual del mínimo caudal diario cada año.

[2]: Corresponde al promedio multianual del máximo caudal diario cada año.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Cambios proyectados para los caudales diarios simulados en los elementos ríos de WEAP en el período 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022.

Río	Promedio [%]	Desviación estándar [%]	Percentil 25% [%]	Percentil 50% [%]	Percentil 75% [%]	Mínimo anual [%][1]	Máximo anual [%][2]
R_CA1	-54.3	-73.8	-43.8	-45.0	-49.2	-40.5	-70.0
R_CA2	-50.3	-62.3	-43.2	-45.5	-48.4	-35.0	-61.6
R_CA3	-50.3	-69.6	-42.9	-44.0	-48.0	-36.3	-72.5
R_CA4	-43.3	-56.8	-40.5	-41.0	-40.9	-33.7	-65.0
R_CA5	-41.6	-53.2	-39.1	-40.4	-38.2	-32.1	-63.4
R_CA6	-40.0	-54.5	-35.5	-34.0	-31.8	-27.5	-60.3
R_CA7	-38.6	-62.7	-33.1	-31.9	-32.9	-32.6	-65.2
R_CA8	-29.9	-31.5	-25.9	-32.3	-29.9	-19.4	-35.9
R_CI1	-44.1	-63.1	-39.1	-39.2	-41.7	-36.7	-68.0
R_CI2	-32.9	-34.3	-33.2	-34.3	-31.4	-29.3	-14.7
R_CI3	-27.8	-22.8	-28.5	-30.2	-24.9	-24.2	-2.3
R_CI4	-32.5	-35.0	-33.5	-36.3	-31.7	-28.1	-25.5
R_CI5	-34.3	-36.6	-26.9	-37.6	-32.7	-21.4	-30.1
R_CI6	-31.9	-32.9	-27.5	-30.5	-20.7	-24.4	0.6
R_DI1	-20.1	-15.2	-19.3	-24.2	-22.9	-11.4	-19.8
R_DI2	-15.5	-7.8	-12.3	-17.2	-19.1	-9.5	-8.0
R_DI3	-24.2	-24.8	-22.0	-29.2	-22.8	-13.3	-27.3
R_MA1	-25.5	-11.4	-21.3	-22.8	-21.2	-21.7	0.7
R_MA2	-23.9	-16.4	-29.3	-30.8	-25.2	-21.5	-5.7
R_MA3	-23.7	-17.4	-28.8	-29.2	-24.4	-22.4	-12.9
R_MA4_7	-21.3	-12.6	-27.7	-31.2	-20.1	-22.3	-11.8
R_MA8	-24.7	-18.7	-25.7	-31.3	-25.7	-15.9	-14.2
R_MA9	-17.7	-11.3	-29.0	-27.8	-14.2	-24.0	-10.9
R_MA10	-17.6	-8.5	-19.4	-20.0	-20.1	-12.7	-0.3
R_MA11	-24.2	-11.3	-22.0	-24.7	-29.3	-16.1	-19.1
R_MA12	-20.2	-2.5	-17.0	-21.2	-25.1	-8.3	-19.6

[1]: Corresponde al promedio multianual del mínimo caudal diario cada año.

[2]: Corresponde al promedio multianual del máximo caudal diario cada año.

Fuente: Elaboración propia.

Los cambios proyectados en caudal superficial diario muestran una disminución en todas sus características, incluyendo el valor promedio y variabilidad, percentiles 25, 50 y 75% y los valores mínimo y máximo promedio multianual. En algunos cauces superficiales se observa una condición contraria; sin embargo, estos son aumentos menores al 1%. En general, se observa que los cambios para cada subzona hidrográfica son variados, presentando algunas condiciones donde un cauce puntual puede presentar cambios más drásticos que el promedio de la subzona. Estos resultados no deben considerarse como que habrá una disminución en la probabilidad de eventos extremos en las

subcuencas del Departamento, sino que como una condición particular resultante del clima seleccionado a analizar.

Respecto a la recarga al sistema subterráneo, la Tabla 37 presenta los cambios proyectados para cada uno de los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico para los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, respecto al período 1993 – 2022. Las proyecciones en la recarga son consistentes con los balances previamente comentados.

Tabla 37. Cambios proyectados en la recarga anual a los sistemas acuíferos del Departamento del Atlántico en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2071, respecto al período 1993 – 2022.

Sistema acuífero	2011-2040	2041-2070
Puerto Colombia – Barranquilla	-7.9	-27.8
Juan de Acosta	-9.4	-33.0
Luruaco	-6.5	-24.9
Piojó	-7.5	-26.9
Río Magdalena	-5.9	-19.5
Sabanalarga	-7.4	-22.2
Tubará	-11.0	-33.0

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al análisis general de las proyecciones del balance hídrico, es importante considerar que este se realizó en términos porcentuales, lo que permite generalizar y comparar las condiciones independientemente de la superficie de las subunidades. Sin embargo, para algunos casos puede ser relevante el análisis en términos de magnitudes, lo cual debe ser considerado al momento de realizar un análisis, por ejemplo, de concesiones.

7.5.2.2. Embalse El Guájaro

En cuanto a las proyecciones para el embalse El Guájaro, la Figura 88 presenta la evolución de niveles en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, considerando que se aplica o no la regla de operación. En la condición sin regla de operación se considera que las compuertas se utilizan para reiniciar el año con un nivel de 4 m.s.n.m (3.45 m de altura de agua desde el nivel del terreno).

Los resultados de niveles del embalse El Guájaro muestran que, si bien el escenario analizado corresponde a una proyección de disminución constante en precipitación, hay años donde se observan comportamientos similares a los vistos el año 2010 y 2011. Esto pone de manifiesto la relevancia de analizar escenarios tanto de disponibilidad total de precipitación y variabilidad para poder cuantificar o analizar la sensibilidad del sistema ante eventos extremos. Adicionalmente, bajo la regla de operación propuesta en CRA (2012), el régimen del embalse en los distintos períodos, incluidos el histórico se regularían de forma similar. Sin embargo, en el período 2041 – 2070 se requiere de un mayor uso de las compuertas para llenar el embalse ante la disminución en precipitaciones. Esta condición es relevante de analizar puesto que bajo ese escenario también habría una disminución en los caudales del canal del Dique, fuente que se usa para llenar el embalse El Guájaro. Se hace relevante poder realizar proyecciones conjuntas con el canal del Dique que permitan analizar la eventual vulnerabilidad del embalse ante escenarios de disminución constante en las precipitaciones y así poder elaborar planes de acción.

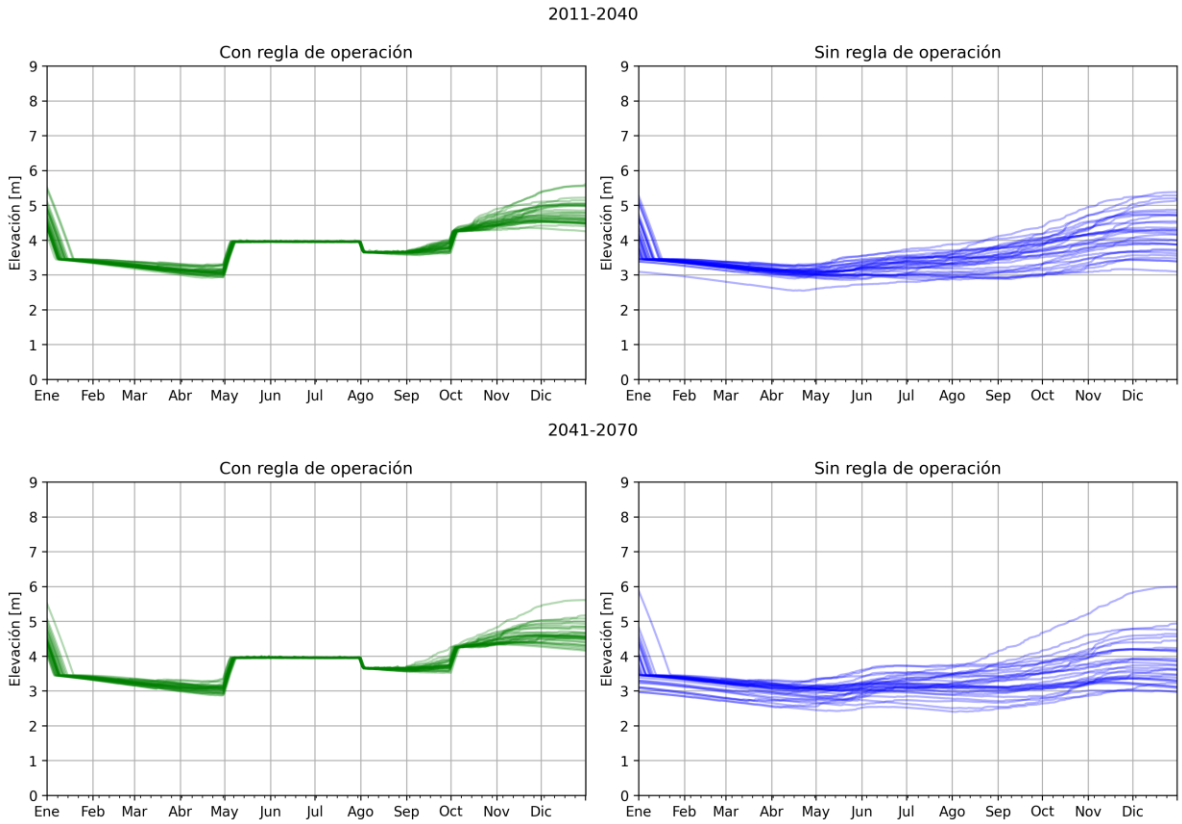


Figura 88. Niveles simulados en el período (arriba) 2011 – 2040 y (abajo) 2041 – 2070 para el embalse El Guájaro (izquierda) con y (derecha) sin la regla de operación establecida en el estudio del embalse El Guájaro.
Nota: En el escenario sin regla de operación se consideró el uso de la compuerta en enero para reiniciar los niveles y evitar divergencia de los niveles a condiciones irreales.
Fuente: Resultados de WEAP.

7.6. Alcances y limitaciones

El modelo ERA-CRA, desarrollado en WEAP, permitió estimar el balance hídrico en el Departamento del Atlántico, considerando distintas subdivisiones tanto administrativas como físicas. Los resultados del modelo ERA-CRA muestran consistencia con las condiciones cualitativas observadas en el Departamento en términos de caudales superficiales y niveles en el embalse El Guájaro. Sin embargo, el modelo ERA-CRA, como todo modelo, es una simplificación de la realidad. Adicionalmente, se debe considerar las incertidumbres asociadas tanto a la información disponible y las simplificaciones que implica el proceso de modelación. A continuación, se presentan las principales limitaciones, alcances y consideraciones del modelo ERA-CRA enfocado no solo en una herramienta para la ERA, sino que una herramienta para la gestión del recurso hídrico.

El modelo ERA-CRA corresponde a un modelo semi-distribuido que integra procesos hidrológicos y de asignación o distribución de agua. Este no es un modelo hidráulico, por lo que no permite analizar directamente procesos de inundación, sino que es un modelo hidrológico enfocado en entender los principales componentes del balance hídrico y distribución de flujos para el apoyo a la toma de decisiones en torno a la gestión del recurso hídrico. Al ser este un modelo forzado principalmente por condiciones climáticas y de usos de agua, es una herramienta idónea para analizar las incertidumbres en torno acciones o medidas de gestión del recurso hídrico.

Respecto a la información disponible para la representación del medio físico en el modelo ERA-CRA, a la fecha no hay información para calibrar los parámetros para la generación de escorrentía superficial y flujo de agua en el suelo. Además, la información para caracterizar el sistema subterráneo a lo largo del Departamento del Atlántico es limitada, pero permitió delimitar las zonas relevantes para el cálculo de la recarga al sistema subterráneo. No hay información para caracterizar la potencial interacción superficial-subterránea en el Departamento, como, por ejemplo, la interacción ciénaga-acuífero, ciénaga-cauces superficiales, embalse El Guájaro-acuífero, entre otras. No hay suficiente información para una modelación detallada de calidad de agua tanto superficial como subterránea. Sin embargo, se contó con información elaborada tanto por la CRA como por organismos colombianos y organismos internacionales para caracterizar el terreno, su cobertura, el tipo de sedimentos y la climatología del Departamento del Atlántico.

Respecto a la representación de las intervenciones antrópicas en el medio físico del Departamento del Atlántico, el modelo ERA-CRA considera únicamente los usos de agua concesionados y correctamente registrados. Se representó el embalse El Guájaro en base a la curva volumen-elevación desarrollada en estudios técnicos anteriores y se implementó una aproximación de las compuertas que lo regulan; sin embargo, la operación de las compuertas no considera aspectos como el control de inundaciones aguas abajo del canal del Dique o procesos migratorios. Por otro lado, el modelo no representa el canal del Dique, por lo que asume que siempre existirá la capacidad de intercambiar flujos entre el canal y el embalse El Guájaro, lo que, en la realidad, no siempre es así.

Finalmente, el modelo ERA-CRA se construyó en base a información detallada y actualizada de la caracterización del terreno, coberturas y uso de la tierra, suelos y climática, resultando en la herramienta más actualizada e integral con la que cuenta la CRA para la gestión de recursos hídricos del Departamento del Atlántico. Independiente de las incertidumbres asociadas, el modelo ERA-CRA es un primer paso para identificar puntos de interés para el levantamiento de información en el Departamento del Atlántico. De todos modos, al momento de tomar decisiones en base a los resultados del modelo ERA-CRA, se debe complementar con información en terreno que permita contrastar estos resultados y alimentar continuamente la herramienta con el objetivo de mejorar su representatividad a las escalas de interés.

7.7. Recomendaciones y trabajo futuro

Como se comentó en la subsección anterior, el modelo ERA-CRA es un primer paso en torno a la gestión integral del recurso hídrico basada en herramientas analíticas y no debe ser el último. Estas herramientas, ya sea por los recursos disponibles para su construcción, la información disponible u otra limitante, deben estar en constante actualización para mejorar su representación y disminuir las incertidumbres de sus resultados.

En esta sección se presentan recomendaciones en torno a la gestión del modelo ERA-CRA y a análisis relevantes para la gestión del recurso hídrico. Estas recomendaciones se agrupan en 1) información prioritaria para mejorar la representatividad del modelo ERA-CRA, 2) información para mejorar las características del modelo ERA-CRA y 3) análisis o evaluaciones en base al modelo ERA-CRA.

Respecto a la información prioritaria para mejorar la representación del modelo ERA-CRA, se recomienda realizar monitoreos de caudales de forma periódica en los cauces superficiales más relevantes o que tengan mayor presencia durante el año. Este monitoreo tendría el objetivo de actualizar los parámetros del método de humedad de suelo del modelo ERA-CRA en base a

información dentro del Departamento del Atlántico. Para lograr el objetivo, se recomienda que los monitoreos se planifiquen con al menos los siguientes objetivos: 1) contrastar los resultados actuales del modelo y 2) cubrir áreas estratégicas que permitan abordar todos los parámetros del método de humedad de suelo del modelo. Por otro lado, se recomienda levantar información de calidad de aguas tanto superficiales como subterráneas, que permitan desarrollar una línea base y entender potenciales vulnerabilidades del sistema. Con esto se esperaría que el modelo ERA-CRA, tal como está construido, mejore su representatividad y se pueda cuantificar la incertidumbre de sus resultados.

Respecto a la información para mejorar las características del modelo ERA-CRA, se recomienda realizar estudios que permitan una caracterización hidrogeológica detallada con el objetivo del desarrollo de un modelo hidrogeológico o de flujo de agua subterránea para el Departamento del Atlántico. Para esto se requerirá de ensayos de bombeo, estudios de trazadores, entre otros, además de elaborar una red de monitoreo de niveles de agua subterránea que permitan comprender su variabilidad y reacción a eventos climáticos. Dentro del Departamento el Atlántico se encuentran diversos cuerpos de agua que podrían depender tanto de aguas superficiales como subterráneas, como las ciénagas (y sistema de ciénagas) y el embalse El Guájaro. Se recomienda desarrollar estudios locales para entender la dinámica y grado de conexión de estos cuerpos de agua y así poder conceptualizar de mejor manera estas dinámicas en la herramienta. La relevancia de estas herramientas es poder entender impactos locales y globales de distintas intervenciones al sistema subterráneo o su respuesta ante distintas condiciones climáticas y así disminuir incertidumbres al momento de cuantificar la oferta hídrica subterránea. Además, es importante considerar que este tipo de modelos hidrogeológicos se pueden acoplar a modelos hidrológicos, como, por ejemplo, el acople del modelo MODFLOW[18] con WEAP para la modelación integrada superficial-subterránea.

Respecto al análisis o evaluaciones en base al modelo ERA-CRA, se recomienda ampliar la cantidad de escenarios climáticos analizados en este estudio para entender cómo responde el sistema físico ante distintas trayectorias climáticas. De forma complementaria, se recomienda estandarizar un protocolo para cuantificar la incertidumbre asociada al clima y servir de base al momento de evaluar medidas de gestión en el modelo y tener un conjunto de resultados que permita identificar grados de confianza en lugar de un único valor determinístico. El modelo ERA-CRA también puede ser utilizado para analizar situaciones de riesgo del embalse El Guájaro. Una alternativa es el desarrollo de escenarios estocásticos con distintas caracterizaciones, en términos de promedio y variabilidad, y comparar la respuesta del embalse año a año. Con los resultados de este esquema se podrá identificar un espectro de condiciones en el embalse en función del clima esperado para el año en cuestión.

De forma complementaria a lo anteriormente mencionado, dado que el Departamento del Atlántico colinda con el mar, se esperaría que exista el proceso intrusión salina tanto en las aguas superficiales como en el sistema subterráneo. La intrusión salina es el reemplazo de agua dulce por agua salada producto de un desbalance entre estos fluidos. En el caso de intrusión salina en aguas subterráneas, este ocurre cuando ocurre un desequilibrio energético entre el agua de mar y los flujos subterráneos continentales, resultando en un ingreso de agua salada al sistema subterráneo. En general, este proceso no es reversible. Este proceso puede verse intensificado por aumentos en el nivel del mar o sobre explotación del sistema subterráneo. En el caso de aguas superficiales, la intrusión salina es un proceso reversible y depende de los cambios en el nivel del río y del mar. En períodos donde el caudal del río que desemboca en el mar disminuye de forma tal que el nivel del mar es mayor al del río, el agua salada entrará hacia el continente y puede generar infiltración de agua salada lejos de la línea

[18] https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/modflow-and-related-programs.

de costa, favoreciendo la intrusión salina en el sistema subterráneo. Para poder analizar y cuantificar esta interacción compleja, se requiere de una caracterización apropiada del sistema subterráneo, además del desarrollo de herramientas analíticas que permitan representar las dinámicas que gobiernan estos procesos. En línea con la construcción de un modelo integrado superficial-subterráneo, el modelo WEAP se puede acoplar al modelo MODFLOW y el módulo de intrusión salina (MODFLOW-SWI2), acople que permite situar de forma integrada el proceso de intrusión salina subterránea en el contexto de cuenca (Aedo et al., 2023). Sin embargo, este esquema WEAP-MODFLOW-SWI2 no se ha analizado aún para representar los aportes o dinámica de intrusión salina en aguas superficiales.

8. Indicadores de la Evaluación Regional del Agua

La Evaluación Regional del Agua (ERA) en Colombia fue establecida mediante el Decreto 1640 de 2012, el cual otorgó un plazo de tres años, a partir del año 2013, para su implementación por parte de las Autoridades Ambientales. La ERA se basa en el análisis de indicadores, presentados en la metodología para la ERA, la cual fue desarrollada por el IDEAM el año 2013 (IDEAM, 2013). Más allá de ser un instrumento para unificar información a nivel regional, la ERA desempeña un papel crucial al proporcionar datos para la Evaluación Nacional del Agua, dirigida por el IDEAM, y para la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), liderada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Los indicadores se calculan por unidad hidrográfica de análisis que para este caso de estudio es a nivel de subcuenca.

En el desarrollo de la ERA-CRA se construyó el modelo ERA-CRA, el cual es una herramienta de modelación y planificación de recursos hídricos, desarrollada en la plataforma WEAP (ver sección 7). El modelo ERA-CRA tiene la capacidad de recopilar información de la CRA relacionada con los aspectos de oferta, demandas, calidad y vulnerabilidad del agua, y, además, permite simular escenarios de gestión y/o clima. Los escenarios por analizar con el modelo ERA-CRA posibilitan la evaluación de la respuesta del sistema e indicadores asociados ante las incertidumbres asociadas tanto al crecimiento poblacional como al cambio climático. Los períodos analizados en este estudio fueron los periodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070, correspondientes al período histórico reciente, futuro de corto plazo y futuro a mediano plazo, respectivamente (ver sección 6).

En las siguientes secciones se presentan las características de cada indicador calculado con el modelo ERA-CRA y las consideraciones tanto para su cálculo como su evaluación. Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos para el escenario concesiones histórico y, en el caso de índices asociados a escenarios sin demandas, aquellos del sistema hídrico natural, el escenario natural (ver sección 6). Estos escenarios representan el clima histórico en el período 1993 – 2022 y demandas, para el escenario de concesiones, según la base de datos de concesiones entregada por la corporación y actualizadas a junio de 2023.

A excepción de los indicadores Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Aguas Subterráneas (IVICAS), Índice de Calidad de Agua (ICA) e Índice de Calidad Biológica del Agua (IMA), el cálculo de los indicadores de la ERA se automatizó dentro de la herramienta WEAP para facilitar la descripción del estado actual y las tendencias del recurso hídrico en la jurisdicción de la CRA, siguiendo la metodología de evaluación de indicadores definida por el IDEAM (IDEAM, 2013).

8.1. Indicadores del Sistema Hídrico Natural

Los indicadores del sistema hídrico natural permiten evaluar la capacidad de retención y regulación de una unidad hidrográfica o subcuenca (Índice de Retención y Regulación Hídrica - IRH), las condiciones de aridez (Índice de Aridez - IA) y la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del sistema subterráneo (Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Agua Subterránea - IVICAS). Estos indicadores se determinan considerando las condiciones naturales del sistema, es decir que no se consideran las extracciones y retornos de agua destinadas a diversos fines.

8.1.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)

El Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) permite evaluar la capacidad de las subcuencas para retener humedad, utilizando como referencia las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este indicador varía en un intervalo de 0 a 1. Un valor cercano a 1 del IRH indica una mayor regulación, resultante de una uniformidad en los caudales diarios. Por otro lado, un valor cercano a 0 indica una mayor disparidad entre los caudales bajos y altos generados en la subcuenca, revelando intervalos de tiempo con magnitudes característicamente altas y/o bajas, así como una variabilidad más marcada. A continuación, se resumen los aspectos clave de este índice, como su significado, la metodología descriptiva y los datos necesarios para su cálculo.

Significado

- Indicador que mide la capacidad de retención de humedad de una subcuenca con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de caudales.
- Indica la homogeneidad o el contraste que existe entre los caudales altos y bajos que genera la subcuenca.
- Representa la regulación de agua señalando aquellas zonas que tienen condiciones mas estables de escurrimiento y regulación de caudales.

Descripción metodológica

- Relación entre el volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la linea de caudal medio y el volumen total en la curva de duracion de caudales.

Fuente y disponibilidad de datos

- Atributos del clima, cobertura, uso de suelo, entre otros.
- Curva de duración de caudales para cada subcuenca del modelo.

El 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), como muestra la Figura 89. La Tabla 38 presenta la clasificación de los valores del IRH. La expresión para calcular el IRH se presenta a continuación:

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

Tabla 38. Categorías para la evaluación del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH).

Rango de valores [-]	Categoría	Características
0.85 – 1.00	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
0.00 – 0.50	Muy baja	Capacidad muy baja de la cuenca para retener y regular agua

Fuente: IDEAM (2013).

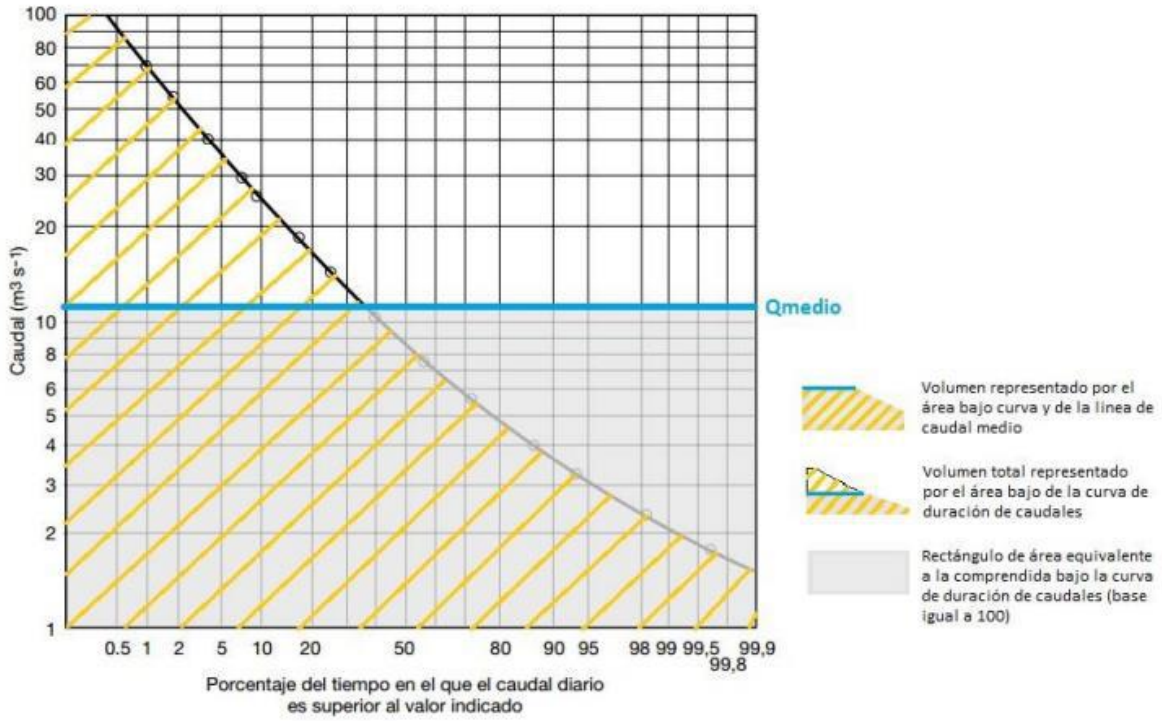


Figura 89. Cálculo del volumen total y del caudal medio en la curva de duración de caudales.
Fuente: IDEAM (2013).

Es fundamental considerar que la capacidad de regulación de una unidad hidrográfica o subcuenca está relacionada a características específicas como la topografía, geología, suelos, vegetación y clima. Por lo tanto, los valores del IRH pueden variar en función de las condiciones presentes en cada una de estas características descritas.

La metodología de cálculo de este índice se presenta a continuación y los resultados del IRH para el Departamento del Atlántico en el período histórico se presentan en la Figura 90.

- Construcción de la curva de duración de caudales medios diarios para cada una de las 26 subcuencas del modelo ERA-CRA. Estas curvas se obtienen posterior a la calibración del modelo y se pueden visualizar en la herramienta web del presente estudio.

- Determinación del volumen total y el volumen correspondiente al caudal medio en la curva de duración de caudales. Para este estudio se consideró el caudal medio como el Q50.
- La determinación del volumen total bajo la curva de duración de caudales, según se especifica en la Figura 89, consideró la discretización mediante trapecios tomando intervalos de porcentajes de excedencia dentro de la curva de duración de caudales. El volumen correspondiente al caudal medio se calculó como la suma del área de un rectángulo de altura igual al caudal medio y base entre los porcentajes 0 y 50 y el área de los trapecios que se generan para porcentajes de excedencia mayores al 50%.
- Se repite el procedimiento para cada uno de los escenarios analizados.

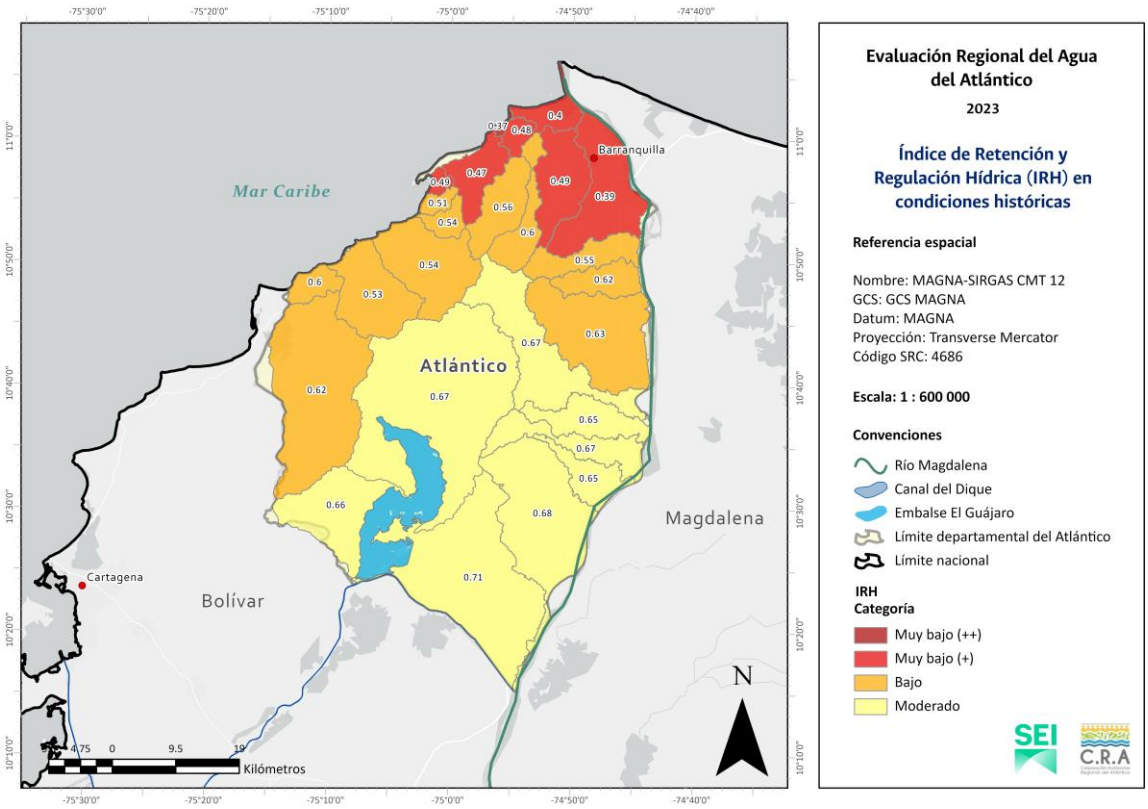


Figura 90. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) en condiciones históricas.
Fuente: Elaboración propia.

El IRH calculado con el modelo ERA-CRA muestra que, en general, la capacidad de retención y regulación de las subcuencas es baja a muy baja, a excepción de las subcuencas abastecedoras del embalse El Guájaro, y abastecedoras del río Magdalena en la zona centro sur del Departamento, las que tienen una capacidad media. Esto se debe a la alta variabilidad que existe entre caudales bajos (marzo) y altos (octubre – noviembre) en el Departamento y a las características de cobertura de cada una de las subcuencas, en donde la cobertura urbana influye considerablemente en la baja retención y regulación de las subcuencas.

8.1.2. Índice de Aridez (IA)

El Índice de Aridez representa la disponibilidad natural de agua para el sistema suelo-planta, identificando áreas donde la vegetación podría experimentar un déficit de agua debido a las

condiciones climáticas y las necesidades óptimas para su desarrollo. Este indicador se encarga de señalar las áreas con déficit o exceso de agua, utilizando cálculos basados en el equilibrio hídrico superficial. Este concepto forma parte de los indicadores establecidos en el ENA 2010 (IDEAM, 2013). Este indicador varía en un intervalo de 0 a 1. Un valor cercano a 1 del IA indica un alto déficit de lluvia y un valor cercano a 0 indica un bajo déficit. A continuación, se resumen aspectos clave para determinar este indicador.

Significado

- Indicador que mide el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de ecosistemas de una región.
- Representa la disponibilidad natural de agua para el conjunto suelo - planta señalando zonas en las que la cobertura vegetal es suceptible a presentar déficit de agua.

Descripción metodológica

- Relación entre la diferencia entre la evapotranspiración potencial y real de la subcuenca sobre la evapotranspiración potencial.

Fuente y disponibilidad de datos

- Atributos del clima, cobertura del suelo.
- Cálculo de la evapotranspiraciión potencial y real a partir de la ecuación de FAO Penman-Monteith.

El IA se calcula teniendo en cuenta la evapotranspiración potencial (ETP) y la evapotranspiración real (ETR). Estos valores se pueden categorizar según se indica en la Tabla 39, donde cifras bajas indican excesos de agua, lo que significa que la precipitación es suficiente para mantener el ecosistema, mientras que cifras altas señalan déficit de agua para el sostenimiento del ecosistema. La expresión para calcular el IA se presenta a continuación:

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

Tabla 39. Categorías para la evaluación del Índice de Aridez (IA).

Rango de valores [-]	Categoría	Características
0.60 – 1.00	Altamente Deficitario	Altamente deficitario de agua
0.50 – 0.60	Deficitario	Deficitario de agua
0.40 – 0.50	Moderado a Deficitario	Moderado a deficitario de agua
0.30 – 0.40	Moderado	Moderado
0.20 – 0.30	Moderado a Excedentes	Moderado a excedentes de agua
0.15 – 0.20	Excedentes	Excedentes de agua
0.00 – 0.15	Altos Excedentes	Altos excedentes de agua

Fuente: IDEAM (2013).

La ETP es calculada internamente por WEAP para cada unidad hidrográfica o subcuenca como $K_c \times ET_{ref}$ (ver sección 7.2)y ETR es un resultado directo del balance hídrico calculado por del modelo ERA-CRA. Los resultados del IA para el Departamento del Atlántico en el período histórico se presentan en la Figura 91.

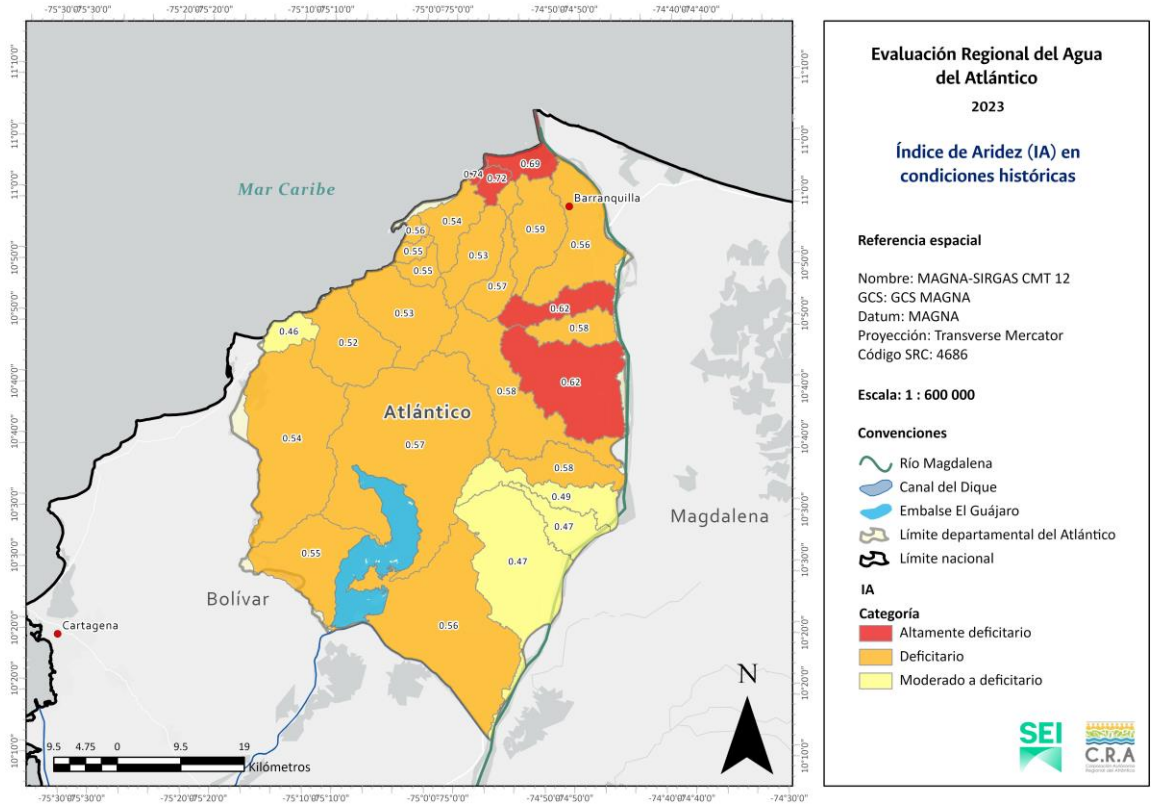


Figura 91. Índice de Aridez (IA) en condiciones históricas.
Fuente: Elaboración propia.

El IA calculado con el modelo ERA-CRA muestra que el Departamento del Atlántico es considerado como árido, es decir, que hay déficit de precipitación para su sostenimiento. Aquellas subcuencas que cuentan con un área considerable de ciénagas tienen una evapotranspiración potencial mayor. Además, en general las coberturas del departamento son pastos o destinadas para el uso agrícola (considerando cultivos transitorios, permanentes y mixtos), las cuales requieren una gran cantidad de agua para su satisfacer sus necesidades hídricas.

8.1.3. Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Aguas Subterráneas (IVICAS)

El Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Aguas Subterráneas (IVICAS) fue diseñado como un indicador para determinar la susceptibilidad de un acuífero o sistema acuífero a la contaminación según sus características intrínsecas. Su cálculo siguió la metodología propuesta por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (MAVDT y Vargas, 2010). Esta guía proporciona diversas metodologías paramétricas (incluyendo superposición e índices) para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos, considerando principalmente tres factores: la capacidad de atenuación de la carga contaminante en el perfil del suelo, la resistencia o inaccesibilidad hidráulica a

la penetración de los contaminantes, y factores externos que puedan facilitar o retrasar el impacto de las cargas contaminantes. A continuación, se resumen los aspectos principales para la determinación de este indicador.

Significado

- Indicador de presión que señala la susceptibilidad (natural) de un sistema acuífero a ser contaminado.
- Apoya la gestión y la política de protección de las aguas subterráneas por lo que se puede articular a otros instrumentos (POT, POMCAS, entre otros).

Descripción metodológica

- Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación a través de índices que evalúan la susceptibilidad de los acuíferos a una carga contaminante puesta en superficie (GOD).
- Relación entre régimen hidráulico del acuífero, características litológicas y profundidad del agua subterránea (resistencia en sentido hidráulico).

Fuente y disponibilidad de datos

- Atributos del suelo, geología, litología e hidrogeología.
- Características de parámetros hidráulicos de infraestructura de extracción de agua.
- Pozos de monitoreo.

A partir de 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* (MAVDT, 2010)".

La metodología GOD para el cálculo del IVICAS considera los siguientes parámetros:

1. Incidencia del agua subterránea (G): 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.
2. Clase general del acuífero (O): representa la litología general de la zona no saturada. 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.
3. Profundidad del agua subterránea (D): está definida por la profundidad desde el terreno al nivel (estático o freático) del agua subterránea. Su puntuación más baja (0.6) pertenece a acuíferos con profundidades superiores a 50 m, mientras que las más altas (1.0) pertenecen a acuíferos con profundidades inferiores a 5 m. Mayor detalle para la calificación de estos tres parámetros mediante el método GOD se puede encontrar en MAVDT y Vargas (2010).

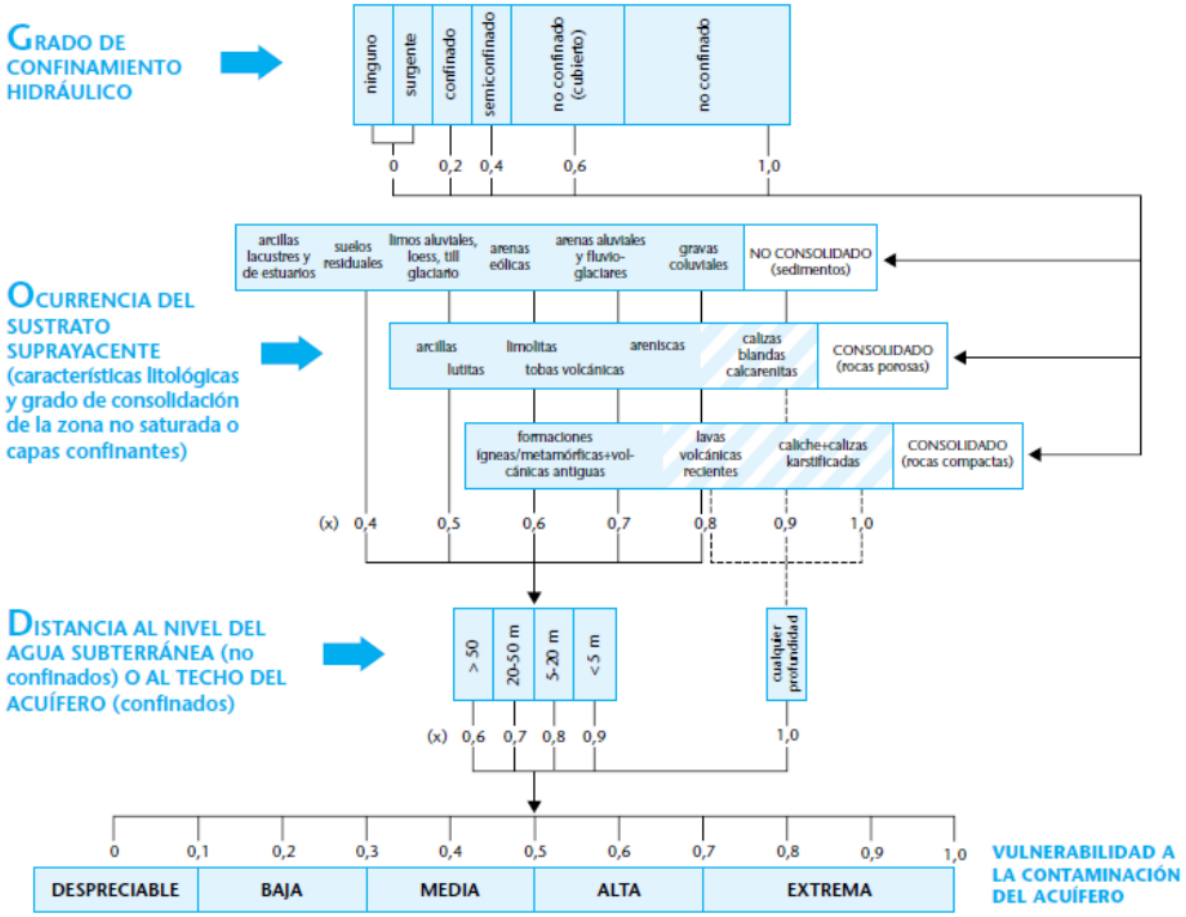


Figura 92. Esquemática para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. Fuente: MAVDT (2010).

El parámetro asociado a la incidencia del agua subterránea o grado de confinamiento hidráulico (parámetro G) se estimó a partir de las unidades hidrogeológicas, presentadas en la sección 3.1.5, y la descripción de estas a partir INGEOMINAS (1985), presentada en la Tabla 5. El parámetro asociado a la litología de la zona no saturada (parámetro O) se estimó a partir de la información de la litología presentada en el informe de suelos de la CRA. El parámetro asociado a la profundidad del agua subterránea (parámetro D) se estimó a partir de una interpolación espacial con el método inverso de la distancia al cuadrado (IDW), de orden 2, de la información de pozos presentados en la sección 3.1.5.

Es importante destacar que este indicador está asociado a las características del suelo y el acuífero y no a características relacionadas con el clima o los vertimientos.

Una vez asignada la calificación a cada uno de los parámetros de este método, el IVICAS se calcula multiplicando estos parámetros entre sí, como lo muestra la siguiente expresión:

$$IVICAS_{GOD} = G \times O \times D$$

El IVICAS puede variar entre 0 y 1, clasificándose en cinco posibles categorías que se distribuyen a lo largo del sistema subterráneo. La Tabla 40 muestra las clases y su significado práctico y la Figura 93 muestra la distribución del IVICAS en el Departamento del Atlántico.

Tabla 40. Categorías del Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Aguas Subterráneas (IVICAS).

Rango de valores [-]	Categoría	Características
0.7 – 1.0	Muy alta	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
0.0 – 0.1	Despreciable	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante

Fuente: MAVDT y Vargas, C. (2010).

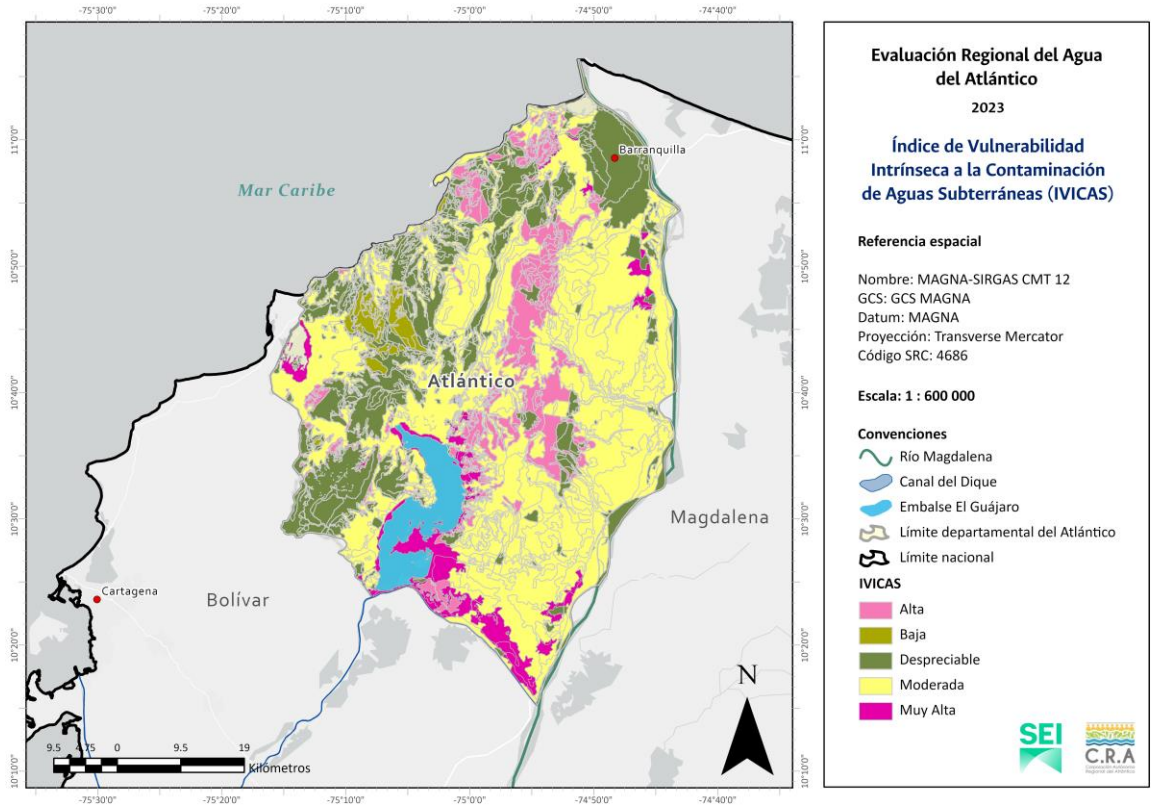


Figura 93. Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Aguas Subterráneas (IVICAS).
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del IVICAS en el Departamento del Atlántico muestran que las categorías despreciable y baja se encuentran principalmente donde se distribuyen las rocas poco permeables, los sedimentos y roca impermeables, la zona de ciénagas y zonas urbanas. La categoría moderada del IVICAS es la que presenta mayor distribución espacial en el Departamento del Atlántico, distribuyéndose principalmente en el sistema acuífero Río Magdalena y donde se encuentran los sedimentos poco permeables. La categoría alta del IVICAS se encuentra principalmente en el sistema acuífero Sabanalarga y en el sector poniente del sistema acuífero Puerto Colombia – Barranquilla. La categoría muy alta del IVICAS tiende a encontrarse en los bordes de los cuerpos de agua que se encuentran en

el Departamento debido en gran medida a la poca profundidad de la napa (consistente con la existencia y características de cuerpos de agua superficiales conectados al sistema superficial) y a la existencia de sedimentos permeables Es importante considerar que en las zonas donde se encuentran zonas urbanas.

8.2. Indicadores de Presión por Uso del Agua

Los indicadores de presión por uso del agua hacen parte de los indicadores de intervención antrópica de la ERA, que, además de considerar factores climáticos, hidrológicos e hidrogeológicos, incorporan la interacción con el uso del agua superficial y subterránea. A continuación, se presentan los cuatro indicadores que relacionan el uso del agua superficial y subterránea con la oferta presente en las fuentes de agua.

8.2.1. Índice de Uso de Agua Superficial (IUA)

El índice de Uso de Agua Superficial (IUA) representa la presión del uso sobre la oferta hídrica disponible superficial tanto para condiciones hidrológicas medias como secas (IDEAM, 2013). Las condiciones secas corresponden al caudal medio seco, el cual corresponde al caudal mínimo medio multianual. A continuación, se resumen los aspectos clave de este índice, como su significado, la metodología descriptiva y los datos necesarios para su cálculo.

Significado

- Representa la presión por el uso sobre la oferta hídrica disponible superficial.

Descripción metodológica

- Se determina como la relación entre el volumen de agua extraída para usos sectoriales en un periodo determinado y la oferta hídrica superficial disponible.
- Se estima para condiciones promedio y de año hidrológico seco.

Fuente y disponibilidad de datos

- Información de la oferta superficial disponible en cada subcuenca.
- Información de las concesiones otorgadas historicamente.

El IUA se determina considerando la demanda hídrica superficial sectorial (Dh_{sup}) y la oferta hídrica superficial regional disponible ($OHRD$). La demanda hídrica sectorial corresponde al valor acumulado de las concesiones otorgadas para diferentes sectores en fuentes superficiales en cada una de las unidades hidrográficas o subcuencas. La expresión para calcular el IUA es la siguiente:

$$IUA = \frac{Dh_{sup}}{OHRD} \times 100$$

La Tabla 41 muestra la clasificación del IUA, donde valores cercanos a 0 corresponde a un bajo uso del agua superficial, valores cercanos a 100, un uso cercano a la oferta total, y valores mayores a 100 corresponden a una demanda mayor a la oferta. Los resultados del IUA en el período histórico para

año medio y seco en el Departamento del Atlántico son presentados en la Figura 94 y Figura 95, respectivamente.

Tabla 41. Categorías para la evaluación del Índice de Uso del Agua Superficial (IUA).

Rango de valores [%]	Categoría	Características
> 100	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible
50 – 100	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
0 – 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible

Fuente: IDEAM (2013).

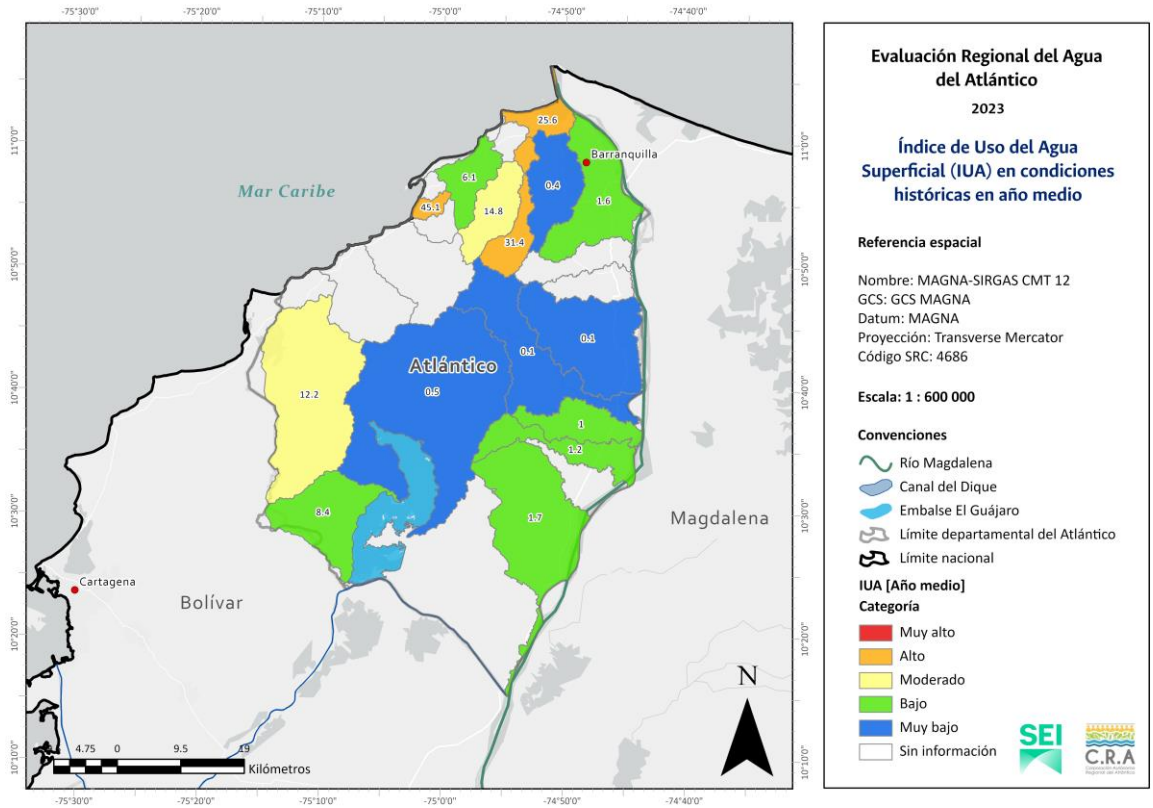


Figura 94. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA) en condiciones históricas año medio.
Fuente: Elaboración propia.

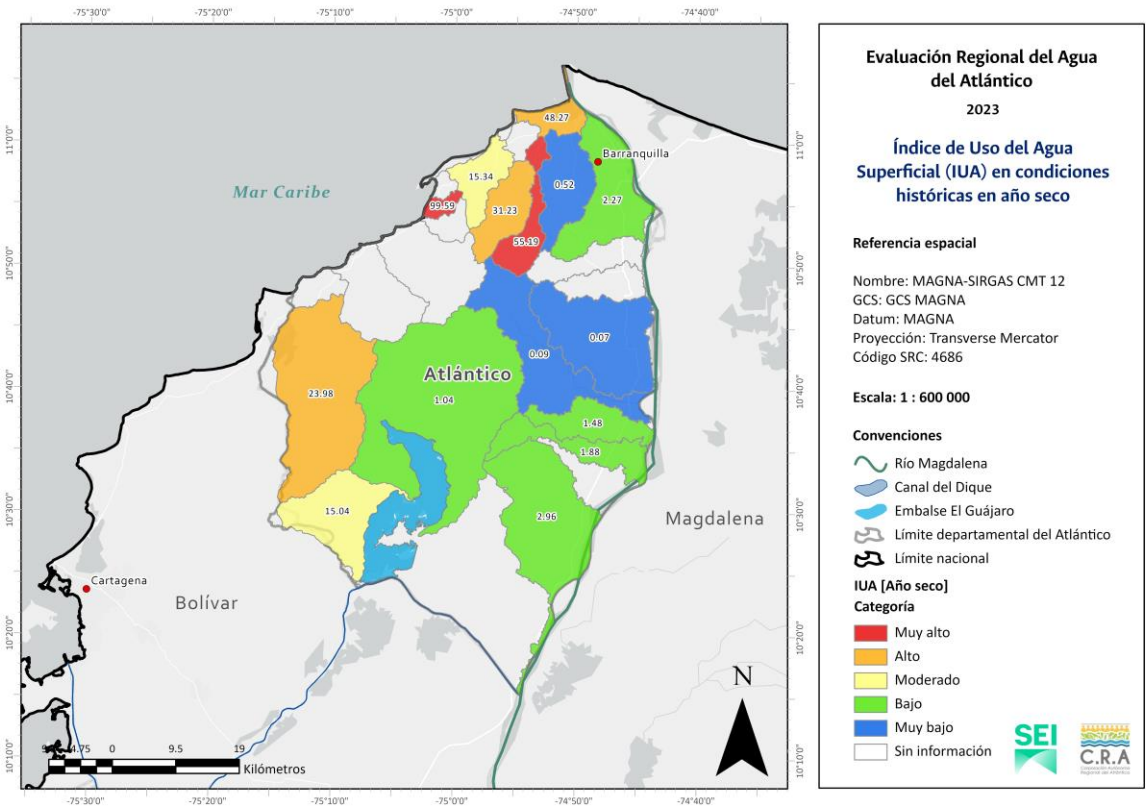


Figura 95. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA) en condiciones históricas año seco.
Fuente: Elaboración propia.

En condiciones de año medio en el período histórico, 3 subcuencas muestran un IUA alto y 2 un IUA moderado, estando estas distribuidas entre las subzonas hidrográficas Mallorquín y Caribe. Por otro lado, 6 subcuencas muestran un IUA bajo y 4 un IUA muy bajo. Esto producto de la priorización del uso de fuentes externas a las subcuencas, como el río Magdalena, Embalse El Guájaro o Canal del Dique que se consideran como prácticamente inagotables y prefieren hacer extracción de ellas. Es importante notar que en 11 de las 26 subcuencas (42%) no se han otorgado concesiones en fuentes superficiales, por lo cual no cuentan con información para la estimación del IUA. Mayor detalle las concesiones otorgadas en las fuentes superficiales se encuentra en la sección 5.3.1.

Para un año seco donde hay menor oferta, el IUA aumenta, en general, en una categoría. Aquellas subcuencas que tenían un IUA bajo, pasan a ser moderados, los moderados a altos y los altos a muy altos. Se recomienda poner atención sobre las subcuencas CI1 – San Luis, CI2 – Oriental Pan de Azúcar, CI6 – Plano Costero en la subzona hidrográfica de la ciénaga de Mallorquín, y en las subcuencas CA3 – Arroyo Caimán y CA8 – Ciénaga del Totumo en la subzona hidrográfica Caribe.

8.2.2. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS)

El índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) representa la presión del uso sobre la oferta hídrica disponible subterránea tanto para condiciones hidrológicas medias como secas (IDEAM, 2013). Las condiciones secas corresponden a la recarga media seca, la cual corresponde a la recarga mínima media multianual. Este indicador se determina tanto para el escenario de concesiones histórico como

potencial. A continuación, se resumen los aspectos clave de este índice, como su significado, la metodología descriptiva y los datos necesarios para su cálculo.

Significado

- Indicador de presión que señala la intensidad de uso sobre la oferta renovable de agua subterránea (recarga).
- Mayores valores señalan mayor presión de la demanda sobre la recarga.

Descripción metodológica

- Relación que se expresa en términos de porcentaje entre la extracción total de aguas subterráneas sobre la recarga en cada subcuenca.

Fuente y disponibilidad de datos

- Atributos hidrogeológicos de los acuíferos.
- Estimación de la recarga.
- Características de extracción de agua.
- Pozos de monitoreo.

El IEAS se determina considerando la extracción total del agua subterránea en un período determinado (Q_{ext}) y la oferta renovable subterránea regional o recarga (Rcg). La expresión para calcular el IEAS es la siguiente:

$$IEAS = \frac{Q_{ext}}{Rcg} \times 100$$

La Tabla 42 muestra la clasificación del IEAS, donde valores cercanos a 0 corresponde a un bajo uso del agua subterránea, valores cercanos a 100, un uso cercano a la oferta total, y valores mayores a 100 corresponden a una demanda mayor a la oferta.

Tabla 42. Categorías para la evaluación del Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS).

Rango de valores [%]	Categoría	Características
> 100	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible
50 – 100	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
0 – 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible

Fuente: IDEAM (2013).

Es importante considerar que los límites de las formaciones geológicas generalmente no coinciden con la extensión de las unidades hidrográficas. La aproximación implementada en el modelo ERA-CRA

(ver sección 7) permite calcular la recarga dentro de cada subcuenca, considerando las características hidrogeológicas y sistemas acuíferos subyacentes a estas subcuencas, y al mismo tiempo poder calcular la recarga diferenciada por sistema acuífero. Los resultados del IEAS en el período histórico para año medio y seco en el Departamento del Atlántico son presentados en la Figura 96 y Figura 97, respectivamente.

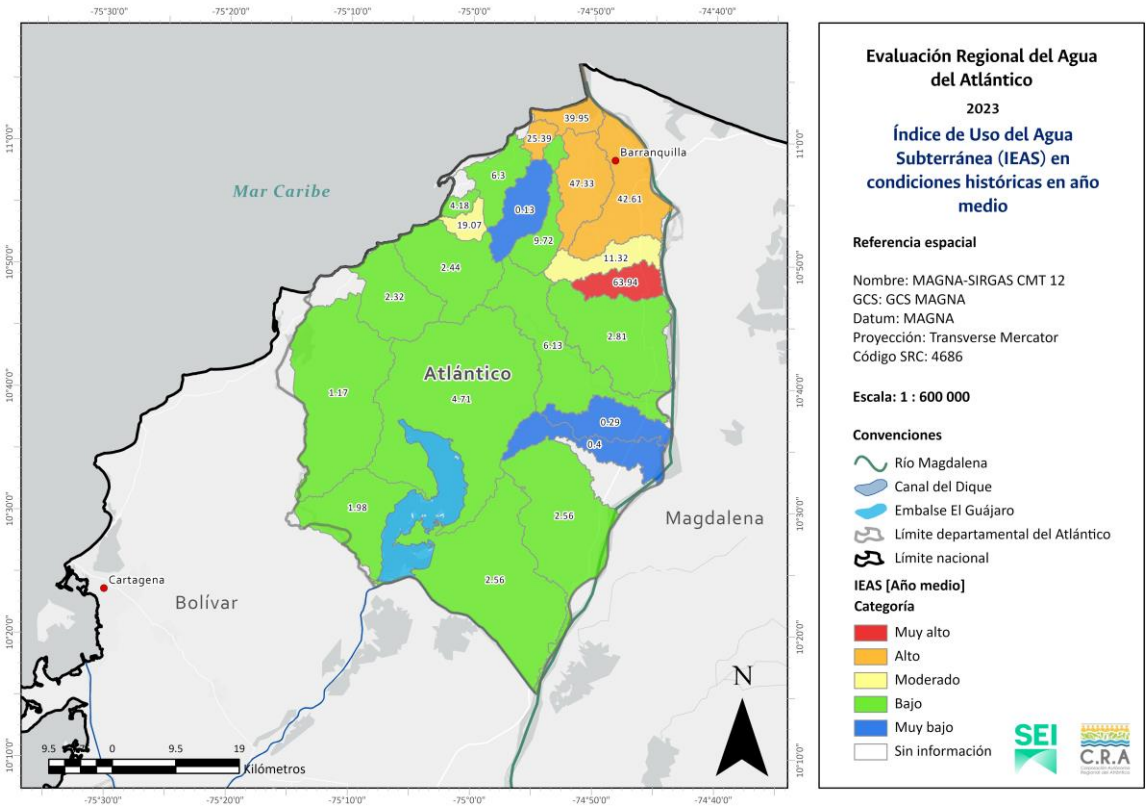


Figura 96. Índice de Uso del Agua Subterránea (IEAS) en condiciones históricas año medio.
Fuente: Elaboración propia.

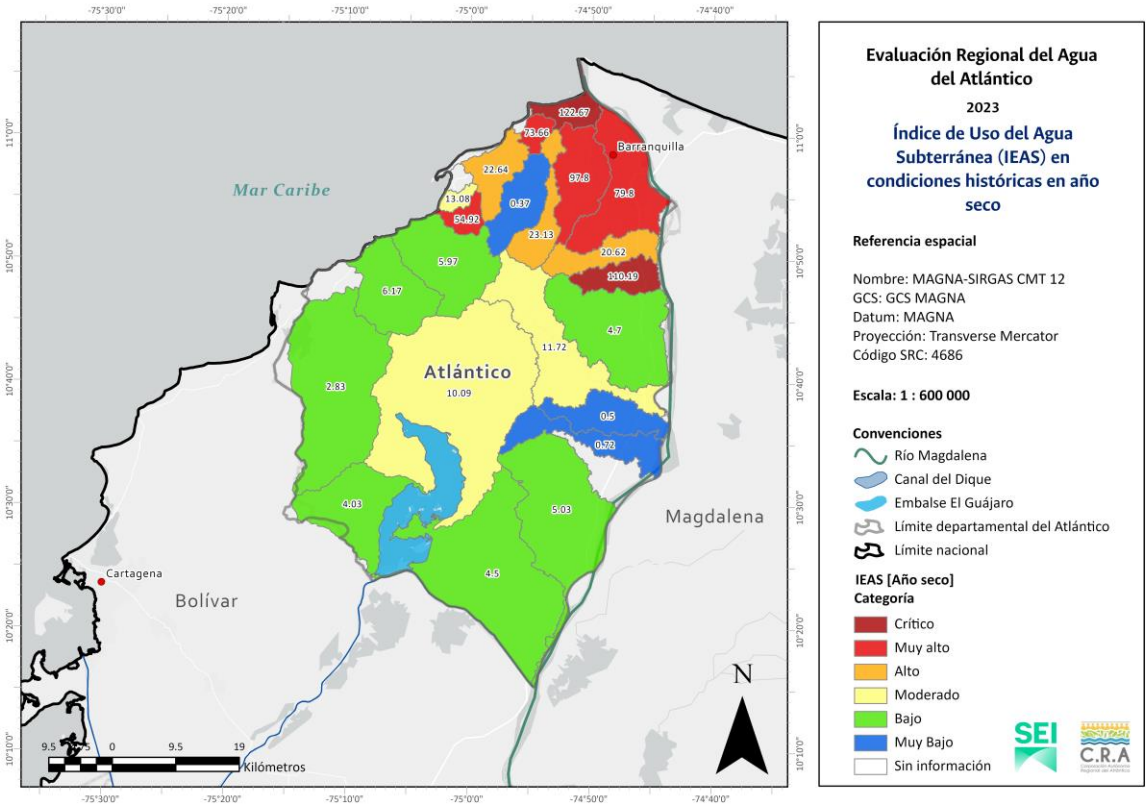


Figura 97. Índice de Uso del Agua Subterránea (IEAS) en condiciones históricas año seco.
Fuente: Elaboración propia.

En condiciones de año medio, el IEAS resulta en una categoría muy alto en la subcuenca MA3 – Ciénaga El Convento, en donde se encuentran muchas industrias que extraen agua subterránea. Adicionalmente, en el norte del Departamento, donde se localizan Malambo y Barranquilla, el IEAS es moderado a alto. En el resto del Departamento, el IEAS resulta en una categoría bajo. Adicionalmente, existen 4 subcuencas donde no hay extracciones de agua subterránea.

En condiciones de año seco, el IEAS cambia considerablemente respecto a las condiciones de año medio. Las subcuencas MA3 – Ciénaga El Convento y CI6 – Plano Costero presentan una situación crítica en donde la demanda supera la oferta disponible. Adicionalmente, la mayoría de las subcuencas asociadas a la subzona hidrográfica de Mallorquín, aquellas localizadas al norte del Departamento pertenecientes al Magdalena y el Arroyo Caja en el Caribe, presentan un IEAS alto a muy alto, por lo cual, en años secos el recurso podría agotarse. Las subcuencas localizadas al centro y sur del departamento presentan un índice de extracción de agua subterránea bajo a moderado.

8.2.3. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público con respecto al número de habitantes (IASAP)

El índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público (IASAP) representa el uso que se hace del agua subterránea para abastecimiento público per cápita (IDEAM, 2013). A continuación, se resumen los aspectos clave de este índice, como su significado, la metodología descriptiva y los datos necesarios para su cálculo.

Significado

- Indicador de presión que señala el uso que se hace del agua subterránea para el abastecimiento publico per cápita.
- Mayores valores señalan un uso importante del recurso en el abastecimiento público.

Descripción metodológica

- Relación entre la extracción de agua subterránea para abastecimiento público en función de numero de habitantes beneficiados con el recurso.

Fuente y disponibilidad de datos

- Atributos hidrogeológicos de los acuíferos.
- Estimación de la recarga.
- Características de extracción de agua.
- Pozos de monitoreo.

El IASAP tiene unidades de litros/habitante-día y se determina a partir de la cantidad de agua subterránea extraída para uso doméstico ($Q_{ext-abastecimiento\ público}$) y el número de habitantes de la población beneficiada. Este indicador está en evaluación en los lineamientos de indicadores (IDEAM, 2013), por lo que no se señalan categorías, sino que se desarrollaron rangos considerando la Resolución 2320 de 2009 del MAVDT y la cantidad mínima para garantizar necesidades básicas. La Tabla 43 presenta las categorías del IASAP, cuya expresión es la siguiente:

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

Tabla 43. Categorías para la evaluación del Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público (IASAP).

Rango de valores [l/hab-día]	Categoría	Características
> 140	Muy alto	Cantidad máxima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante en clima frío o templado en un sistema con nivel de complejidad muy alto
125 - 140	Alto	Cantidad máxima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante en clima frío o templado en un sistema con nivel de complejidad alto
115 – 125	Medio	Cantidad máxima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante en clima frío o templado en un sistema con nivel de complejidad medio
90 – 115	Bajo	Cantidad máxima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante en clima frío o templado en un sistema con nivel de complejidad bajo
50 – 90	Muy bajo	Cantidad máxima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante en clima frío o templado en un sistema con nivel de complejidad muy bajo
0 – 50	Insuficiente	Cantidad de agua resulta insuficiente para suplir necesidades básicas de supervivencia (Gleick, 1996)

Fuente: IDEAM (2013).

Este indicador se fundamenta en los indicadores previos y, por lo tanto, comparte variables y limitaciones similares. Un aspecto importante para destacar es que la evaluación de este indicador fue posible gracias a la capacidad de discriminar las concesiones otorgadas por la CRA, no solo según la fuente, sino también según el tipo de uso. Sin embargo, no hay una cobertura de la información en la totalidad del Departamento. En este sentido, los usos destinados al abastecimiento municipal urbano y la población correspondiente sirvieron como base para la evaluación de este indicador. Los resultados del IASAP para el Departamento del Atlántico en el período histórico se presentan en la Figura 98.

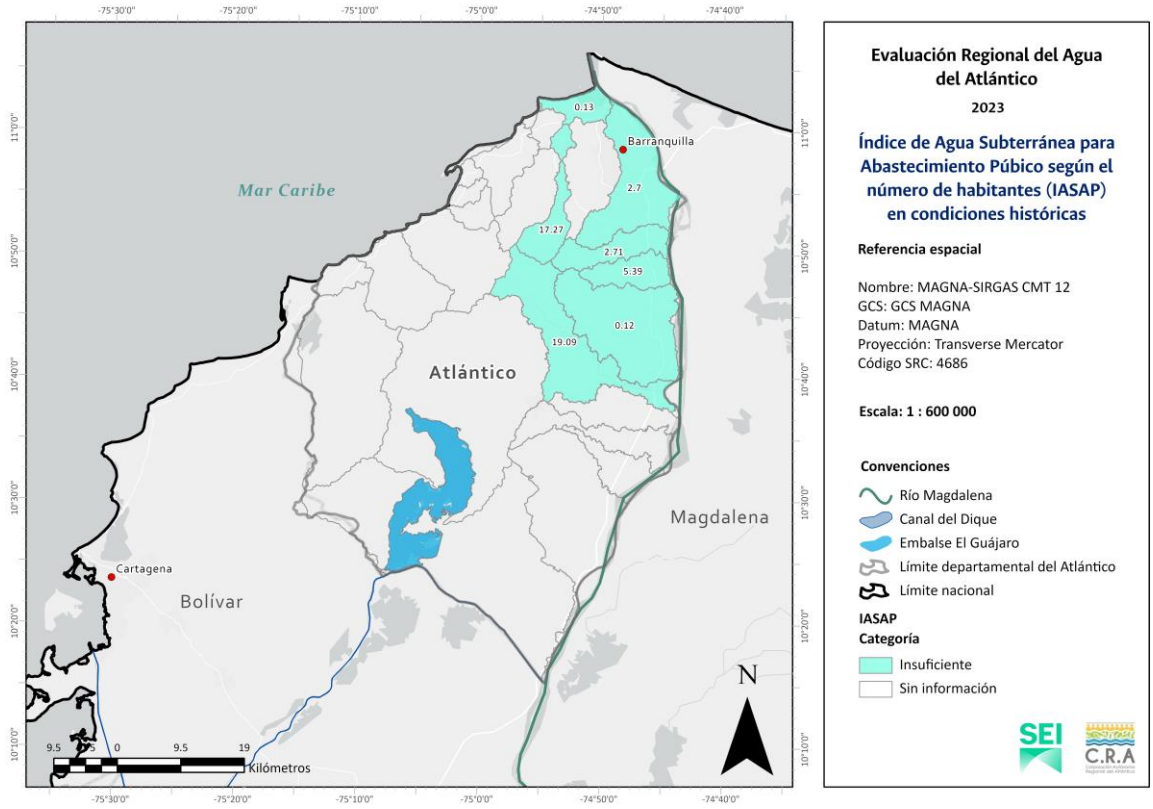


Figura 98. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Púbico según el número de habitantes (IASAP) en condiciones históricas.
Fuente: Elaboración propia.

En todas las subcuencas donde se contó con información tanto de extracción para abastecimiento público como de número de habitantes, el IASAP calculado entra en la categoría de insuficiente. Esto indica que el agua subterránea en el Departamento del Atlántico se está utilizando para otro tipo de usos. De las 26 subcuencas delimitadas, en solo 7 se hace uso del agua para uso doméstico municipal. Estas son: MA1 – Urbano y Ciénaga La Bahía, MA2 – Ciénaga de Malambo, MA3 – Ciénaga El Convento, MA4_7 – Ciénaga Sabanagrande – Santo Tomás – Luisa Mantí y Paraíso, MA8 – Arroyo Grande, todas localizadas en la subzona hidrográfica del Magdalena y CI2 – Oriental Pan de Azúcar y CI6 – Plano Costero en la subzona hidrográfica de Mallorquín. En las subzonas hidrográficas del Caribe y del Canal del Dique no se identificaron extracciones de agua subterránea para uso municipal.

8.2.4. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA)

El índice Integral del Uso del Agua (IIUA) representa la presión por uso en relación con la oferta disponible de aguas superficiales y la oferta renovable de aguas subterráneas tanto para condiciones hidrológicas medias como secas (IDEAM, 2013). Las condiciones secas corresponden al caudal medio y la recarga media seca, los cuales corresponden a los valores mínimos medio multianual. Este indicador se determina tanto para el escenario de concesiones histórico como potencial. A continuación, se resumen los aspectos clave de este índice, como su significado, la metodología descriptiva y los datos necesarios para su cálculo.

Significado

- Representa la presión por el uso sobre la oferta hídrica disponible de aguas superficiales y la oferta renovable de aguas subterráneas.

Descripción metodológica

- Se determina como la relación entre el volumen de agua extraída para usos sectoriales en un periodo determinado sobre la oferta total hídrica disponible (superficial y subterránea).
- Se estima para condiciones promedio y de año hidrológico seco.

Fuente y disponibilidad de datos

- Información de la oferta total disponible en cada unidad hidrológica.
- Información de las concesiones otorgadas históricamente.

Donde el IIUA se determina considerando la demanda sectorial total (Dh), la oferta renovable de aguas subterráneas (O_{rg}) y la oferta superficial de agua disponible (O_d). La expresión para calcular el IUA es la siguiente:

$$IIUA = \frac{Dh}{O_{rg} + O_d} \times 100$$

La Tabla 44 muestra la clasificación del IIUA, donde valores cercanos a 0 corresponde a un bajo uso del agua tanto superficial como subterráneo, valores cercanos a 100, un uso cercano a la oferta total, y valores mayores a 100 corresponden a una demanda mayor a la oferta. Los resultados del IIUA en el período histórico para año medio y seco en el Departamento del Atlántico son presentados en la Figura 99 y Figura 100, respectivamente.

Tabla 44. Categorías para la evaluación del Índice Integral del Uso del Agua (IIUA).

Rango de valores [%]	Categoría	Características
> 100	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible
50 – 100	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

Rango de valores [%]	Categoría	Características
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
0 – 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible

Fuente: IDEAM (2013).

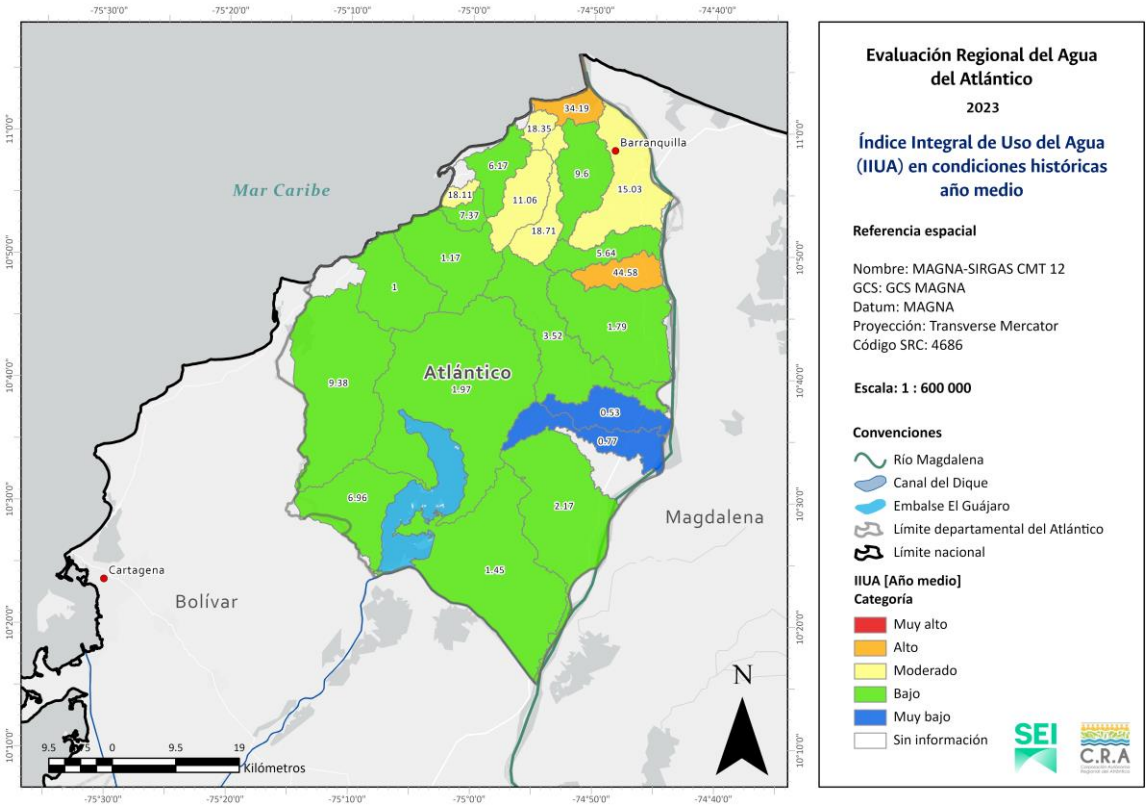


Figura 99. Índice Integral de Uso del Agua (IIUA) en condiciones históricas año medio.
Fuente: Elaboración propia.

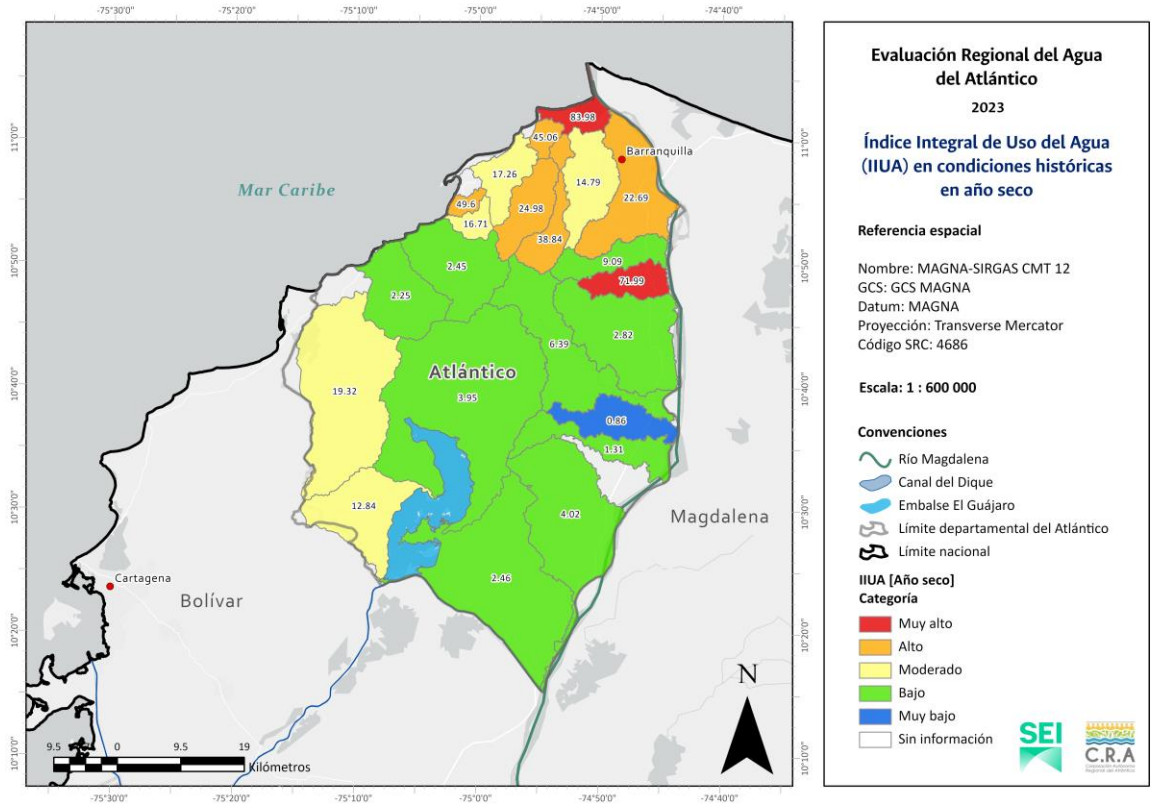


Figura 100. Índice Integral de Uso del Agua (IIUA) en condiciones históricas año seco.
Fuente: Elaboración propia.

Para condiciones de año medio, el IIUA en el Departamento del Atlántico es, en general, bajo, debido a la baja presión que existe sobre las fuentes superficiales; esto sumado a la alta oferta subterránea disponible. Sin embargo, este índice es alto en las subcuencas MA3 – Ciénaga El Convento y CI6 – Plano Costero, la primera debido a la muy alta presión que existe sobre las fuentes subterráneas, y en la segunda debido a que existe presión alta en fuentes superficiales y subterráneas respecto a la oferta disponible.

Para condiciones de año seco, el IIUA clasifica entre las categorías moderado a alto en la parte norte del Departamento debido a que existe una alta presión en estas subcuencas para la oferta total, tanto subterránea como superficial, razón por la cual se recomienda evaluar detalladamente los permisos de concesiones futuras que puedan otorgarse dentro de estas subcuencas.

8.3. Indicadores de Estado de Calidad y Presión por Contaminación

Para evaluar el estado de la calidad de las fuentes hídricas se consideran tres indicadores; dos de ellos dan muestra de las condiciones actuales de calidad de agua que son el Índice de Calidad de agua (ICA) y el Índice de Calidad Biológica del Agua - Macroinvertebrados Acuáticos (IMA), y un Índice de presión considerando la afectación potencial de la calidad de agua de los sistemas hídricos (IACAL).

8.3.1. Índice de Calidad del Agua (ICA)

El Índice de Calidad del Agua (ICA) permite evaluar el estado del recurso hídrico en términos de su calidad considerando determinantes convencionales. Para el cálculo del ICA, se adoptó la definición del IDEAM (IDEAM, 2013), que emplea siete parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relacionados con actividades domésticas, agrícolas y pecuarias. Este cálculo considera funciones de transformación de las mediciones de calidad del agua, que generan valores comprendidos entre 0 y 1. Una vez que los parámetros están en la misma escala, se determina un promedio asignando pesos según la relevancia de cada parámetro. Para llevar a cabo este proceso, se utiliza la siguiente fórmula:

$$ICA = \sum_{i=0}^{n} w_i \times I_i$$

donde, w_i corresponde al ponderador o peso asignado a la variable de calidad i e I_i es el indicador de la variable i, obtenido de aplicar la función de transformación correspondiente.

En la Tabla 45, 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 (IDEAM, 2013). Estos valores son ponderados usando el peso definido en la misma tabla. Usando los rangos definidos en la Tabla 46 se obtiene la calificación de la calidad de agua para cada punto de monitoreo en cada momento de medición.

De acuerdo con los parámetros de calidad de agua monitoreados históricamente en cada punto se definió utilizar un ICA de 5 parámetros en lugar de un ICA de 7 parámetros, debido a que pocos muestreos tenían mediciones de Coliformes Totales y Fósforo Total y Nitrógeno Total.

Tabla 45. Parámetros de calidad de agua incluidos en el Índice de Calidad del Agua (ICA) y su función de transformación.

Variable	Unidad	Peso	Ecuación
Oxígeno Disuelto	% Saturación	0.2	$PSOD = Ox * 100 Cp$ $PSOD$: Porcentaje de saturación de Od $Iod = 1-(1-0.01 * PSod)$
SST	mg/l	0.2	$Isst = 1-(0.02+0.003 * SST)$ Si SST<4.5 entonces Isst=1 Si SST>320 entonces $Isst$=0
DQO	mg/l	0.2	Si DQO<20, entonces $Idqo$=0.91 Si 20< DQO <25 entonces $Idqo$ =0.71 Si 25< DQO <40, entonces $Idqo$ =0.51 Si 40< DQO <80, entonces, $Idqo$ =0.26 Si DQO >80, entonces $Idqo$ =0.125
Conductividad eléctrica	µS/cm	0.2	$ICE = 1-10(-3.26+1.34 \log_{10} ce)$ Si ICE<0 entonces ICE =0
pH	Unidades de Ph	0.2	Si pH <4entonces IpH =0.1 Si 4< pH <7 $IpH = 0.02628419 * epH * 0.520025$ Si 7< pH <8 IpH =1 Si 8< pH <11 $IpH = e[(pH-8)-05187742]$ Si P >11. IpH =0.1

Fuente: IDEAM (2013).

Tabla 46. Categorías para la Evaluación del Índice de Calidad del Agua (ICA).

Rango de valores	Categoría	Características
0.00 – 0.25	Muy mala	La calidad del agua del río en el punto es muy mala
0.26 – 0.50	Mala	La calidad del agua del río en el punto es mala
0.51 – 0.70	Regular	La calidad del agua del río en el punto es regular
0.71 – 0.90	Buena	La calidad del agua del río en el punto es buena
0.91 – 1.00	Muy buena	La calidad del agua del río en el punto es muy buena

Fuente: IDEAM (2013).

A continuación, se describe el significado, método de cálculo y fuentes de datos para obtener el ICA.

Significado

- Representa la calidad del agua en términos de parámetros convencionales.

Descripción metodológica

- Para su cálculo se aplican funciones de transformación que normalizan concentraciones de 7 determiantes de calidad de agua, para después promediar.

Fuente y disponibilidad de datos

- Monitoreos de calidad de agua en ríos.

En la Figura 101 pueden observarse los resultados del cálculo del ICA de 5 parámetros de acuerdo con las mediciones de calidad de agua en los últimos años de medición en cada estación de calidad de agua. En general, los cuerpos de agua presentan un estado malo y regular y en pocos casos aceptable.

En la Figura 102, puede observarse un análisis estadístico de las estaciones de calidad de agua a partir de los diagramas de caja de las mediciones de cada estación. Nótese que en general, la calidad de los cuerpos de agua se encuentra en la franja regular, resaltada con color amarillo. Esta figura puede consultarse en detalle en la plataforma construida para este convenio, en la pestaña calidad de agua/ICA/Datos (https://latinoamericasei.shinyapps.io/ERA_CRA/).

Para cada una de las estaciones de calidad de agua también es posible analizar las tendencias de la calidad de acuerdo con las mediciones históricas del indicador ICA. Como ejemplo, en la Figura 103 a. se observa la tendencia de la Cienaga Mayorquí, que de acuerdo con las mediciones desde el año 2014 a 2017 se mantiene la calidad del agua. En la Figura 103 b. se observa la tendencia en la estación Magdalena, Canal del Dique, Canta Lucía-INCORA, donde se observa una mejora en términos de la calidad de agua respecto al ICA de 5 parámetros estimado en este estudio. Esta figura puede consultarse en detalle en la plataforma construida para este convenio, en la pestaña calidad de agua/ICA/Tendencias (https://latinoamericasei.shinyapps.io/ERA_CRA/).

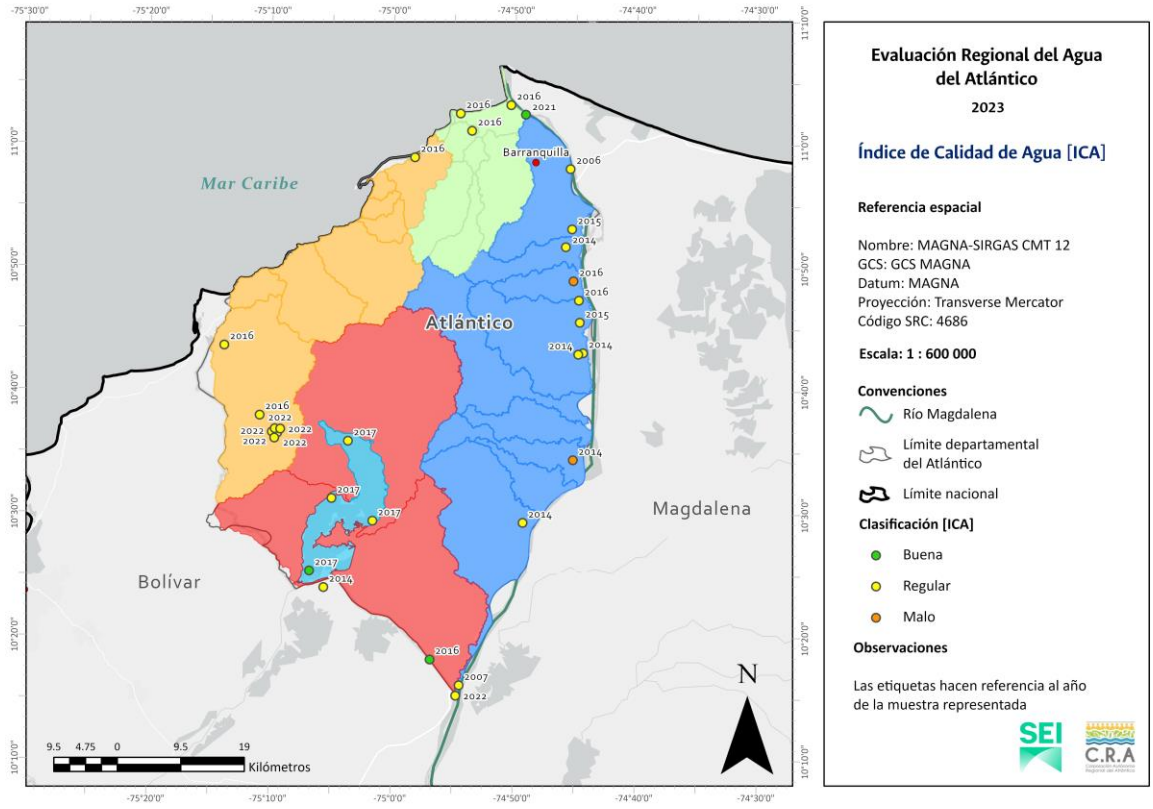


Figura 101. Índice de calidad del Agua (ICA) últimos años de medición en cada estación de calidad.
Fuente: Elaboración propia.

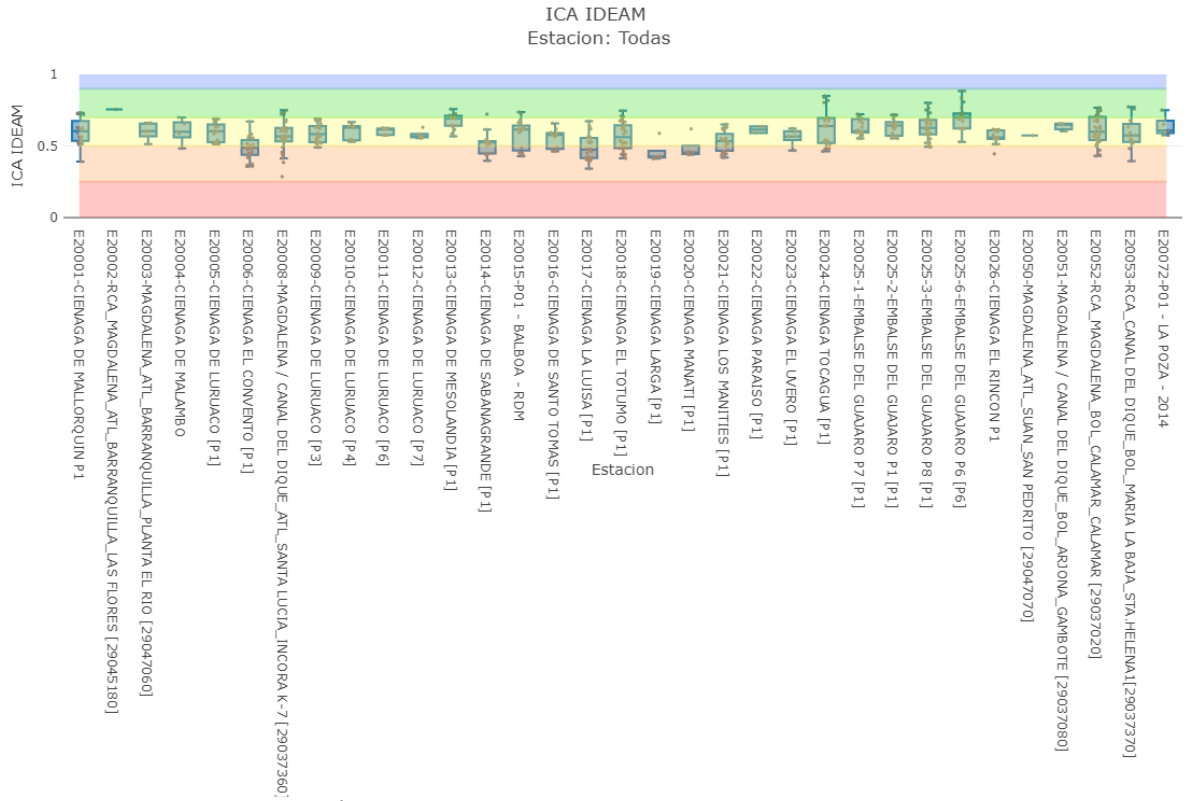


Figura 102. Diagrama de cajas del Índice de calidad del Agua (ICA) para todas las estaciones de monitoreo.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 103. Tendencias del Índice de calidad del Agua (ICA) últimos años de medición en cada estación de calidad. Fuente: Elaboración propia.

8.3.2. Índice de Calidad Biológica del Agua – Macroinvertebrados Acuáticos (IMA)

Gabriel Roldán ha introducido en Colombia el método Biological Monitoring Working Party (BMWP) como una herramienta inicial para evaluar los ecosistemas acuáticos. Este enfoque implica realizar muestreos cualitativos basados en el conocimiento local sobre los diversos grupos de macroinvertebrados hasta el nivel de familia. Cada familia recibe una puntuación de acuerdo con la tolerancia de sus diferentes grupos a la contaminación orgánica. El método se centra únicamente en la identificación taxonómica de los organismos hasta el nivel de familia y los datos obtenidos son cualitativos.

El puntaje oscila entre 1 y 10 de acuerdo con la tolerancia de las familias a la contaminación:

- 1: Familias que viven en aguas muy contaminadas
- 10: Familias sensibles que no toleran la contaminación

La suma de los puntajes de todas las familias presentes proporciona el puntaje total del BMWP/Col. Cuanto mayor es la puntuación final, menor es el grado de contaminación ambiental.

Tabla 47. Clasificación del Índice de Calidad Biológica del Agua – Macroinvertebrados Acuáticos (IMA).

Clase	Calidad	BMWP/Col	Categoría/Clasificación
I	Buena	> 150, 101 – 120	Aguas muy limpias
II	Aceptable	61 – 100	Se evidencian efectos de la contaminación
III	Dudosa	36 – 60	Aguas moderadamente contaminadas
IV	Critica	16 – 35	Aguas muy contaminadas
V	Muy Critica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas, situación crítica

Fuente: Roldán (2003).

En la Tabla 48 se presentan los puntajes que se asignan a cada una de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el cálculo del índice BMWP/Col.

Tabla 48. Puntajes de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Col.

Puntaje	Familia
10	Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae
9	Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae.
8	Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae.
7	Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossossomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae.
6	Aeshnidae, Ancylidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.
5	Belostomatidae, Gelastocoridae, Hydropsychidae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae.
4	Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolicopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae.
3	Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae
2	Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae.
1	Tubificidae

Fuente: Roldán (2016).

En la CRA se realizaron mediciones de macroinvertebrados acuáticos en el año 2020 y los resultados se consolidan en la Figura 104. Se obtuvieron 12 mediciones del indicador en cuerpo de agua lénticos que se encuentran en el rango de dudoso, crítico y muy crítico, tal como se presenta en la Figura 104.

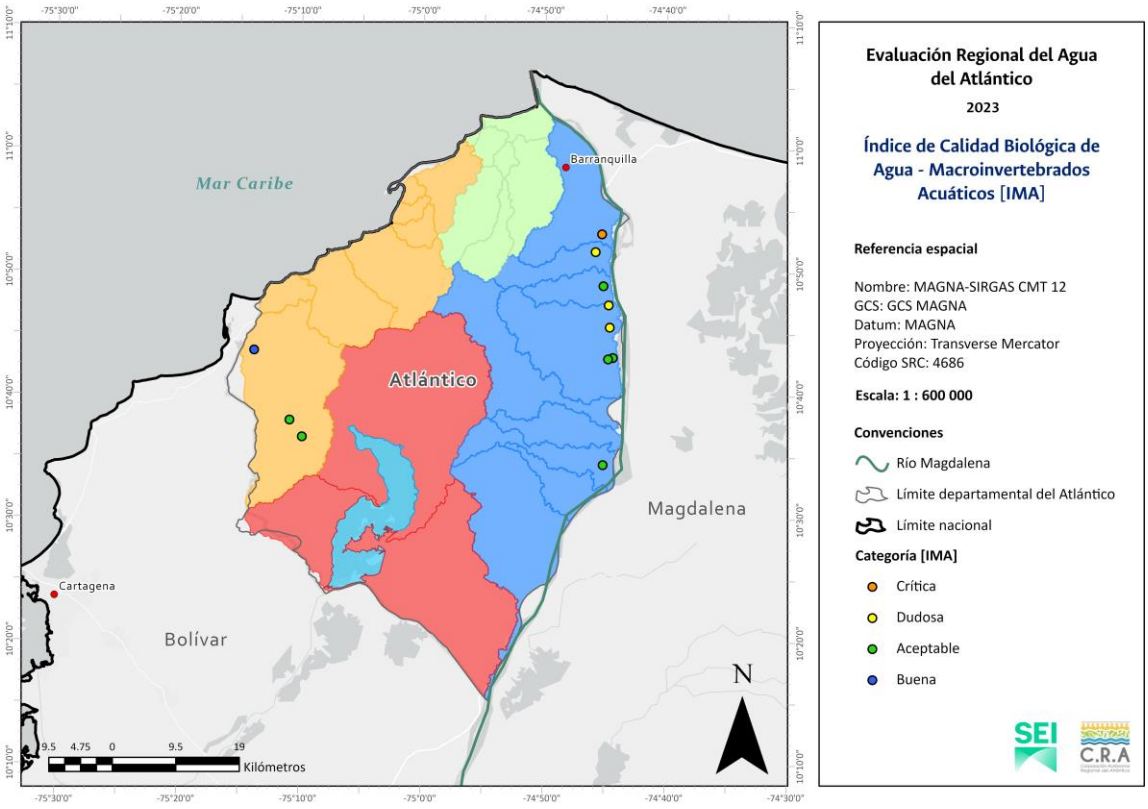


Figura 104. Índice de Macroinvertebrados Acuáticos BMWP/Col (IMA).
Fuente: Elaboración propia.

8.3.3. Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL)

El Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua (IACAL) indica la susceptibilidad de los sistemas hídricos en una subcuenca a la contaminación, permitiendo la identificación de áreas sensibles ante cargas contaminantes consideradas altas o muy altas en un período específico. Este índice, expresado numéricamente, resulta de la relación entre la carga contaminante para una subcuenca en un lapso determinado y la oferta hídrica superficial, tanto en años medios como secos.

El cálculo de este indicador busca identificar la carga contaminante potencial asociada a las actividades antrópicas en la región, reconociendo que dicha carga puede afectar la calidad del recurso hídrico, especialmente en función del caudal en el cuerpo de agua receptor. Se anticipa que, en años secos, manteniendo constante la carga, la alteración potencial de la calidad del agua sea más pronunciada. Esta estimación se alinea con el objetivo de la Política Nacional del Agua, que busca mejorar la calidad y reducir la contaminación del recurso hídrico.

La vulnerabilidad del recurso hídrico en cuanto a la calidad se encuentra vinculada a la variabilidad climática y depende de la disponibilidad natural o regulada del agua, así como de la presión ejercida por los usos y consumos de la población circundante, así como de los vertimientos en las corrientes. A medida que aumentan las cargas contaminantes de distintos sectores, se reduce la capacidad de autodepuración del sistema hídrico, afectando su idoneidad para ciertos usos y los servicios ambientales que proporciona.

La evaluación temporal de la vulnerabilidad, representada por la alteración potencial de la calidad del agua, facilita la interpretación, la identificación de tendencias y la toma de decisiones por parte de las autoridades. Las fuentes hídricas superficiales transportan contaminantes según la actividad económica, como la agricultura, ganadería y minería, generando cargas difusas relacionadas con áreas de producción y el tipo de actividad, a menudo sin tratamiento adecuado.

El IACAL se calcula por subcuenca, determinando la carga de contaminación como la suma de las caras por cada tipo de actividad socioeconómica (doméstica, agrícola, pecuaria) en cada subcuenca, divido por la oferta hídrica en año medio y seco.

Flujo de información para evaluar el IACAL

El primer paso es determinar los potenciales factores de cargas contaminantes sectoriales, las cuales luego se escalan a nivel municipal y de subcuenca espacial para cada uno de los 5 parámetros de interés, como se muestra en la *Figura* 105.

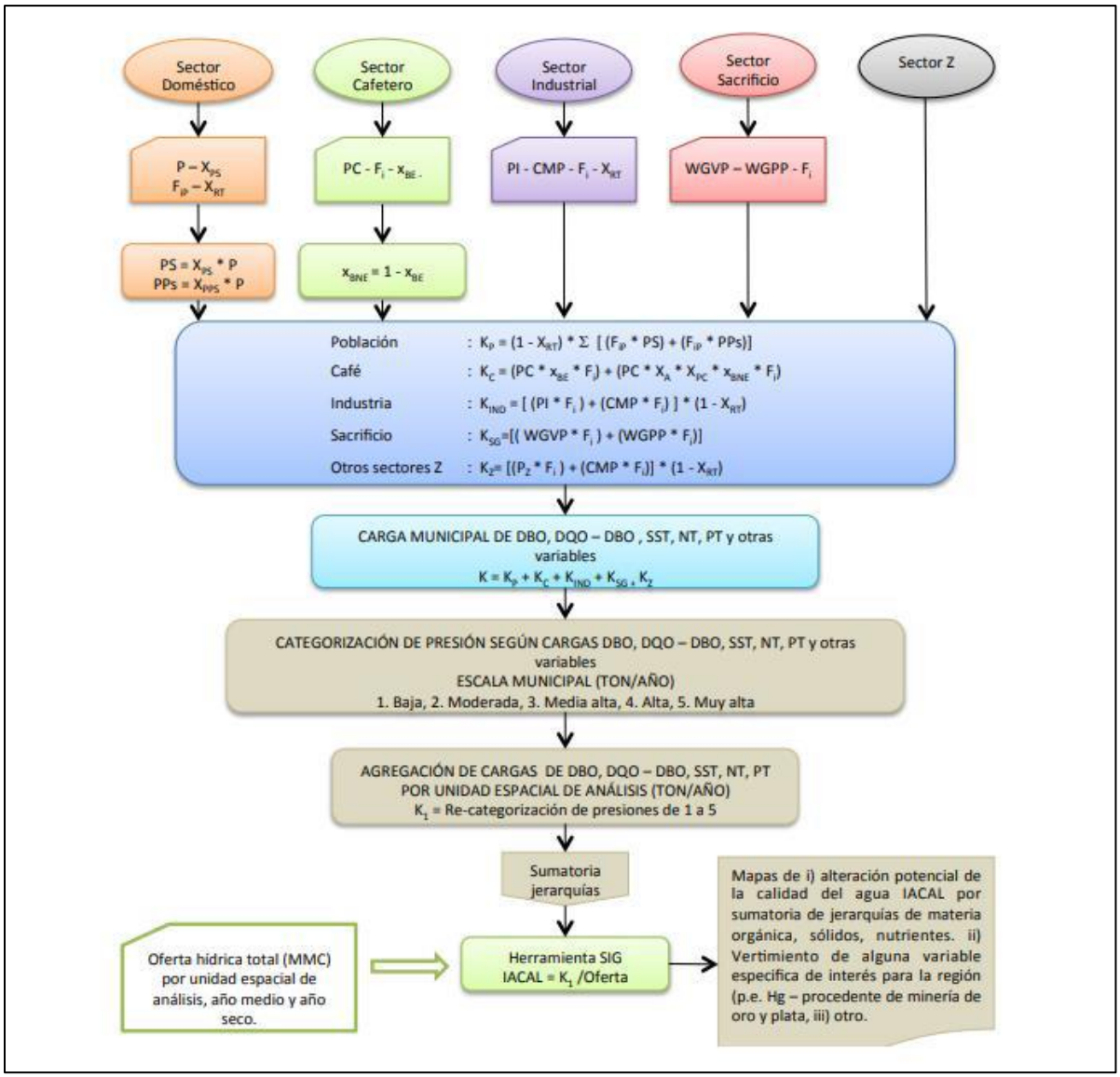


Figura 105. Flujo de trabajo para procesar la información para el Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL). Fuente: Estudio Nacional del Agua (2010) modificado para la ERA.

Las cargas contaminantes proyectadas por subcuenca incluyen la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Suspendidos Totales (SST), el Fósforo Total (PT) y el Nitrógeno Total (NT). Estas cargas se dividen por la oferta correspondiente a los años medios y secos en cada una de las subcuencas.

Cada carga contaminante se calcula sumando las cargas estimadas para cada tipo de uso, utilizando factores de vertimiento específicos para cada uno de los 5 parámetros, en las cabeceras municipales situadas dentro de cada subcuenca. Estas cargas se determinan para la población, áreas de cultivos permanentes, transitorios y mixtos, así como para actividades pecuarias como bovinos, porcinos y aves.

La Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS) representa el volumen de agua que fluye por la superficie del suelo, sin infiltrarse o evaporarse, concentrándose en los cauces de los ríos o en cuerpos de agua lénticos en una unidad subcuenca (área, zona y subzona), es decir, la escorrentía.

Los resultados de las cinco estimaciones, tanto para el año medio como para el año seco, se comparan con los rangos establecidos en tablas de referencia elaboradas para cada una de las variables (Tabla 49).

Tabla 49. Categorías y descriptores de presión por subcuenca de acuerdo con el cociente de carga (ton/año) /oferta total (hm³).

Clasificación de la amenaza	Categoría	Rangos [t/hm³]				
		DBO	DQO - DBO	NT	PT	SST
Baja	1	0 - 0.14	0 - 0.14	0 - 0.03	0 - 0.005	0 - 0.4
Moderada	2	0.14 - 0.4	0.14 - 0.36	0.03 - 0.06	0.005-0.014	0.4 - 0.8
Media-Alta	3	0.4 - 1.21	0.36 - 1.17	0.06 - 1.14	0.014-0.036	0.8 - 1.9
Alta	4	1.21 - 4.86	1.17 - 6.78	1.14 - 0.56	0.036-0.135	1.9 - 7.7
Muy Alta	5	> 4.86	> 6.78	> 0.56	> 0.135	> 7.7

Fuente: IDEAM (2013).

El valor del indicador surge de promediar el valor de las categorías de clasificación obtenidas para cada una de las variables, como se señala en la Tabla 50.

Tabla 50. Clasificación y descriptor del Índice de Alteración Potencial a la Calidad de Agua (IACAL).

DBO+(DQO-DBO) +SST+NT+PT/5	
Categoría	Valor
Baja	< 1.5
Moderada	1.5
Media – Alta	2.5
Alta	3.5
Muy alta	4.5

Fuente: IDEAM (2013).

La categoría muy alto es predominante en los resultados y se decide dividir esta clasificación en 5 subcategorías: Muy alta IV para valores por encima de 4.875, Muy alta III para valores por encima de 4.750, Muy alta II para valores por encima de 4.625, Muy alta I para valores por encima de 4.5. Se ha generado un Anexo IACAL para mostrar a mayor profundidad el ingreso de la información a WEAP. A continuación, se presenta un resumen general sobre el IACAL.

Significado

- Representa las cargas potenciales de las diferentes actividades antrópicas por caudal medio o seco en cada subcuenca.

Descripción metodológica

- Para su cálculo se obtienen en WEAP las cargas de las demandas de las actividades económicas en una subcuenca y se divide por el caudal en cada microcuenca.

Fuente y disponibilidad de datos

- Coberturas, población rural y urbana (censo de la población) tipos de cultivos (censo agropecuario), cargas unitarias (sectores económicos).

Cargas por tipo de actividad económica

Para determinar las cargas potenciales por actividad económica se definieron módulos de carga para los determinantes de calidad de agua incluidos en el IACAL. Esta información se obtuvo de fuentes de información secundaria. En la Tabla 51 se presentan las cargas contaminantes estimadas por actividad económica estimadas para esta región de acuerdo con información secundaria.

Tabla 51. Cargas unitarias estimadas por actividad económica.

	Domésticas		Agrícola			Pecuario	
ADR Doméstica	Urbano (alcantarillado)	Rural (pozo séptico)	Cultivos permanentes – Palma de aceite	Cultivos transitorios – Cereales: Arroz	Cultivos mixtos – Frijol y Maíz	Ganado	Aves
	kg/persona-año		kg/Ha-año			kg/animal-año	
DBO	18.1	6.9	0	222.3	0	17.2	2.5
DQO	28.3	10.8	0	444.6	0	28.7	5.4
Nitrógeno Total	3.3	1.2	0	28.5	0	11.4	10.1
Fósforo Total	1.4	0.5	0	0	0	5.2	0.7
Sólidos Suspendidos Totales	10.0	3.8	0	68.4	0	11.5	0.6

Fuente:. Reglamento de agua potable y Saneamiento básico (RAS, 2000), IDEAM Cargas de contaminación por sector, Fedegan.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta dentro del modelo ERA-CRA y en la formulación del IACAL aquellas áreas del Departamento que presentan tratamiento y el porcentaje de cobertura por municipio para las personas conectadas al sistema de alcantarillado. La mayoría de los municipios presentan un tratamiento primario con lagunas de oxidación donde la carga contaminante de DBO y DQO se supone se reduce un 35% y la carga de Solidos Suspendidos Totales un 60%. El municipio de Malambo adicionalmente tiene tratamiento UASB donde las cargas de DBO, DQO y SST se supone se reducen un 70% y adicionalmente se reduce la carga contaminante por los nutrientes de Nitrógeno y Fosforo en un 20%.

La calidad del agua en el Departamento del Atlántico tiene un alto potencial de ser contaminada para año medio (ver Figura 106) y la situación es más crítica para año seco (ver Figura 107). Esto se debe

principalmente a que, a pesar de que se han hecho altos esfuerzos en mejorar la calidad de agua del Departamento con sistemas de tratamiento por lagunas de oxidación, la oferta hídrica superficial disponible en el Departamento es muy baja, generando categorías muy altas para las cargas contaminantes asociadas al indicador.

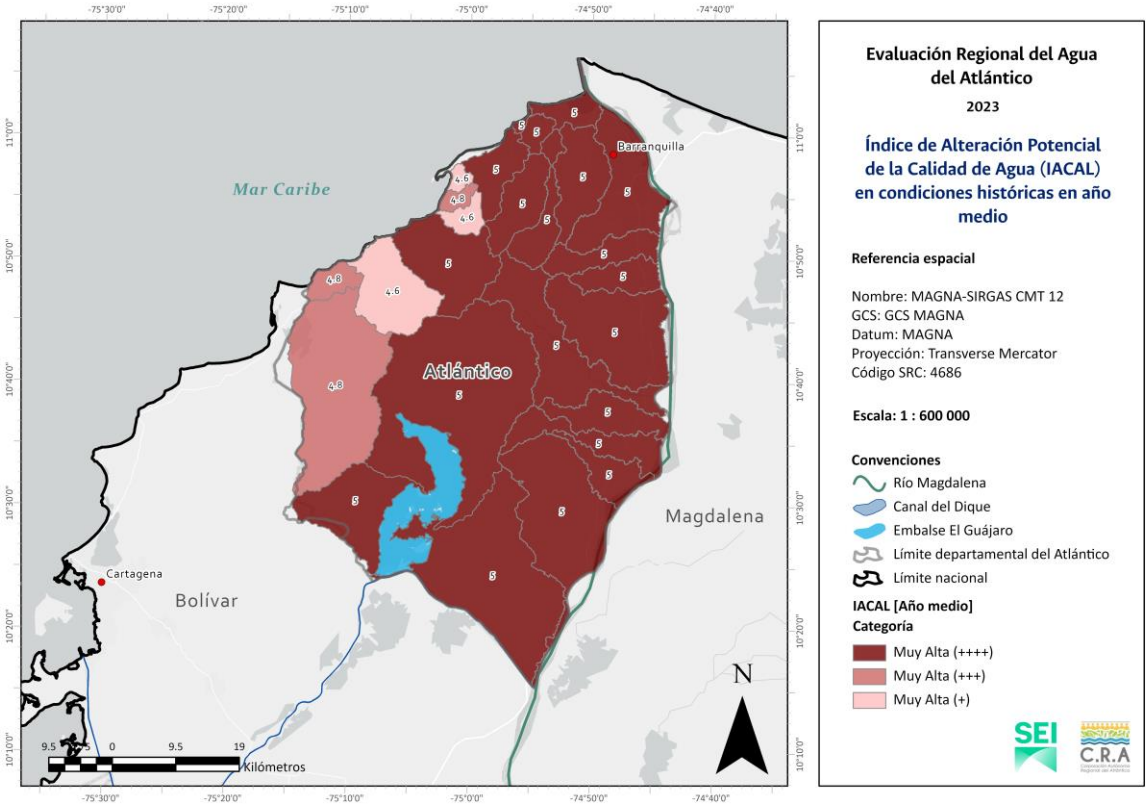


Figura 106. Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua (IACAL) en condiciones históricas año medio
Fuente: Elaboración propia.

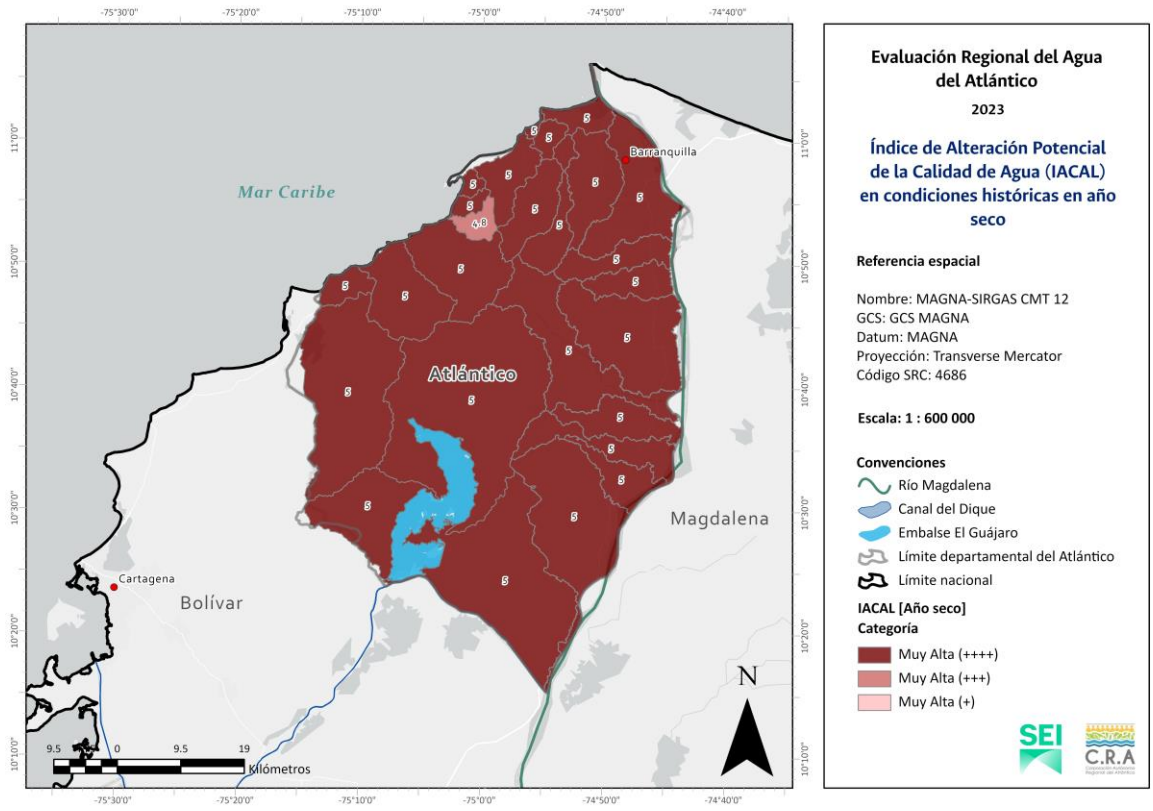


Figura 107. Índice de Alteración Potencial de la Calidad de Agua (IACAL) en condiciones históricas año seco
Fuente: Elaboración propia.

8.4. Indicadores de Riesgo

El análisis de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico natural y del recurso hídrico se basó en dos indicadores clave: el Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) y el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET). Estos dos indicadores se presentan a continuación.

8.4.1. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH)

El Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) refleja la fragilidad del sistema hídrico en mantener un suministro de agua que, frente a amenazas específicas, podría resultar en riesgos de escasez (IDEAM, 2013). A continuación, se resumen los aspectos clave de este índice, como su significado, la metodología descriptiva y los datos necesarios para su cálculo.

Significado

- Representa el grado de fragilidad de la subceuenca para mantener una oferta para abastecimiento de agua que ante una amenaza pueda generar riesgos de desabastecimiento.

Descripción metodológica

- Se determina mediante una matriz que relaciona el Indice de Retención y Regulación Hídrica IRH) y el Índice de Uso del Agua (IUA).

Fuente y disponibilidad de datos

- Información requerida para determinar el IRH y el IUA.

El IVH se determina mediante el uso de una matriz que vincula el Índice de Uso de Agua (IUA, presentado la sección 8.2.1) con el Índice de Regulación Hídrica (IRH, presentado en la sección 8.1.1). Esta relación se presenta en la Tabla 52.

Tabla 52. Categorías para la clasificación del Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH).

Índice de Uso de Agua (IUA)	Índice de Regulación (IRH)	Categoría (IVH)
Muy Baja	Alta	Muy Baja
Muy Baja	Media	Baja
Baja	Alta	
Baja	Media	
Muy Baja	Baja	Media
Muy Baja	Muy Baja	
Baja	Baja	
Baja	Muy Baja	
Moderada	Alta	
Moderada	Media	
Alta	Alta	
Muy Alta	Alta	
Moderada	Baja	Alta
Moderada	Muy Baja	
Alta	Media	
Alta	Baja	
Muy Alta	Media	
Muy Alta	Baja	
Alta	Muy Baja	Muy Alta
Muy Alta	Muy Baja	

Fuente: IDEAM (2013).

La Figura 108 y Figura 109 presentan los resultados del IVH para el Departamento del Atlántico en el período histórico para condición de año medio y seco, respectivamente. El IVH está relacionado únicamente con la oferta y presión superficial al considerar únicamente el IRH y el IUA, respectivamente, dentro de la matriz. Es por esto por lo que, en aquellas subcuencas donde no se han otorgado concesiones en fuentes superficiales no se calculó el IVH.

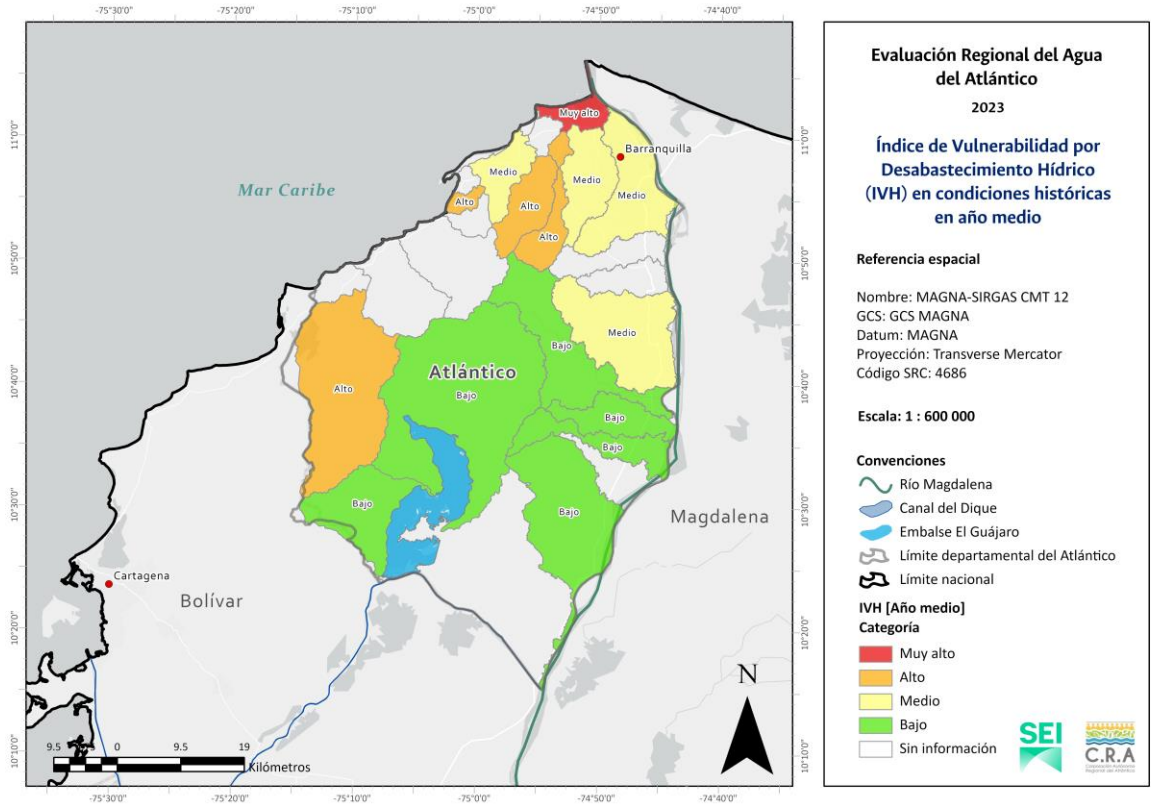


Figura 108. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condiciones históricas año medio. Fuente: Elaboración propia.

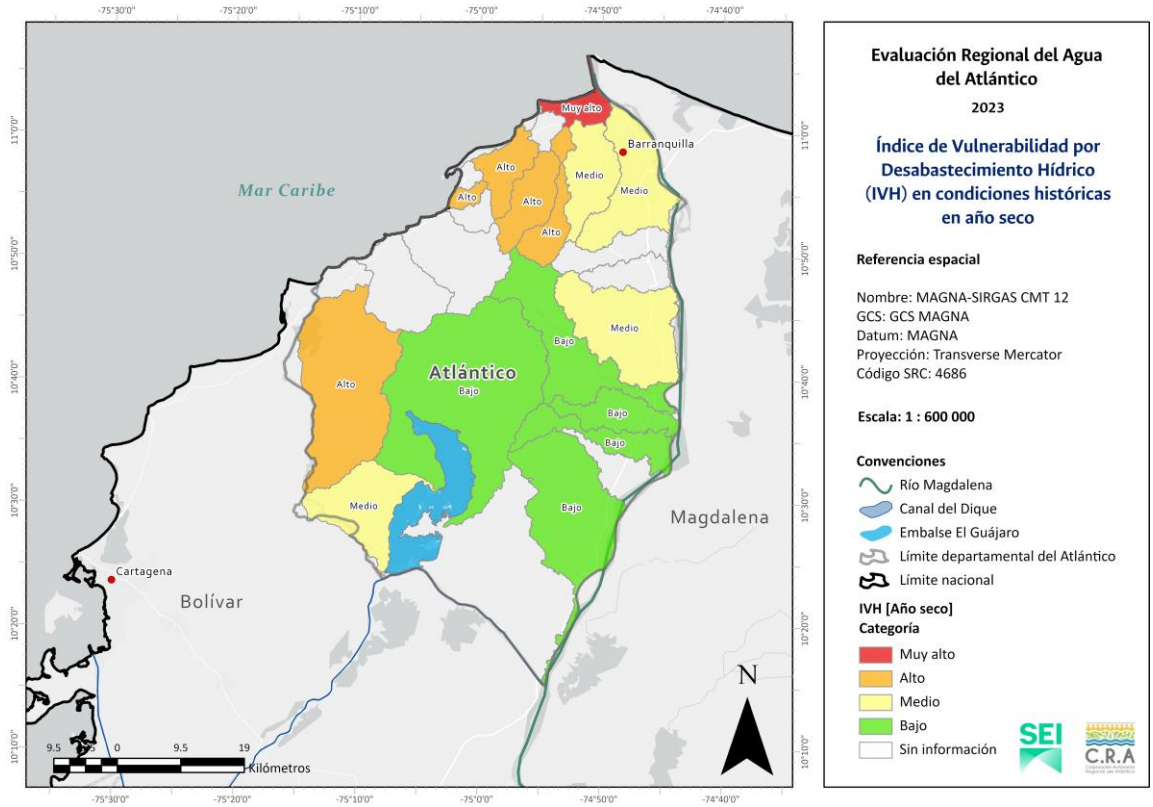


Figura 109. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condiciones históricas año seco. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del IVH para condición de año medio muestra una única subcuenca con condición muy alto, correspondiente a la subcuenca CI6 – Plano Costero, la cual tiene una capacidad de retención muy baja y una presión sobre fuentes superficiales alta. Las subcuencas de la subzona Caribe presentan una vulnerabilidad alta, a excepción de la subcuenca CA1 – Ciénaga Balboa que presenta una vulnerabilidad moderada, al igual que las subcuencas de la subzona Magdalena que se localizan al norte del Departamento. Las subcuencas abastecedoras del embalse El Guájaro y de la subzona Magdalena en el centro sur del Departamento presentan una vulnerabilidad baja, principalmente por su regulación moderada y baja presión sobre fuentes superficiales.

Para condiciones de año seco, la vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico solo presenta cambios en dos subcuencas respecto al año medio. Una de ellas es la subcuenca CA1 – Ciénaga Balboa, que pasa a tener una vulnerabilidad alta y la subcuenca occidental del embalse El Guájaro, que pasa a una vulnerabilidad moderada debido a los cambios que ocurren en el IUA al haber menor oferta disponible. Las demás subcuencas mantienen su categoría.

8.4.2. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)

El Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales representa la susceptibilidad de las subcuencas ante eventos torrenciales mediante la combinación de un índice morfométrico de torrencialidad y un índice de variabilidad (IDEAM, 2013). El índice morfométrico de torrencialidad vincula diversos parámetros morfométricos de las áreas aportantes al cierre de cada subcuenca, como el coeficiente de forma, la pendiente media de la microcuenca y la densidad de drenaje. Estos factores proporcionan información sobre la probabilidad de escorrentía, infiltración y capacidad de transporte de sedimentos en una unidad de análisis durante eventos de precipitación. En cuanto al índice de variabilidad, este establece la relación entre las fluctuaciones en los valores de caudales mínimos y máximos dentro de una unidad hidrológica. A continuación, se resumen los aspectos clave de este índice, como su significado, la metodología descriptiva y los datos necesarios para su cálculo.

Significado

- Evalúa el grado de suceptibilidad de la subcuenca a eventos torrenciales considerando las caracteristicas morfométricas de la misma y la variabilidad entre los caudales.

Descripción metodológica

- Se determina como una relación entre el índice morfométrico y el índice de variabilidad.
- Cada indicador tiene una clasificación específica.

Fuente y disponibilidad de datos

- Para el indice morfometrico se requiere determinar la densidad de drenaje del área aportante al cierre de la subcuenca, la pendiente media y el coeficiente de compacidad. Se requieren datos como todos los cuerpos de agua presentes en la unidad hidrografica y un modelo de elevación digital del terreno.
- Para el índice de variabilidad se requiere utilizar la curva de duración de caudales.

El IVET se determina a partir de una matriz de decisión que relaciona el índice morfométrico y el índice de variabilidad, como muestra la Tabla 53, y sus resultados en el período histórico se presentan en la Figura 110. Posterior a la presentación de resultados del IVET en el período histórico se resumen los principales componentes para el cálculo del IVET.

Tabla 53. Matriz de decisión para la clasificación del Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET).

Índice de variabilidad	**Índice morfométrico de torrencialidad**				
	Muy bajo	Bajo	Media	Alta	Muy alta
Muy baja	Muy baja	Muy 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

Fuente: IDEAM (2013).

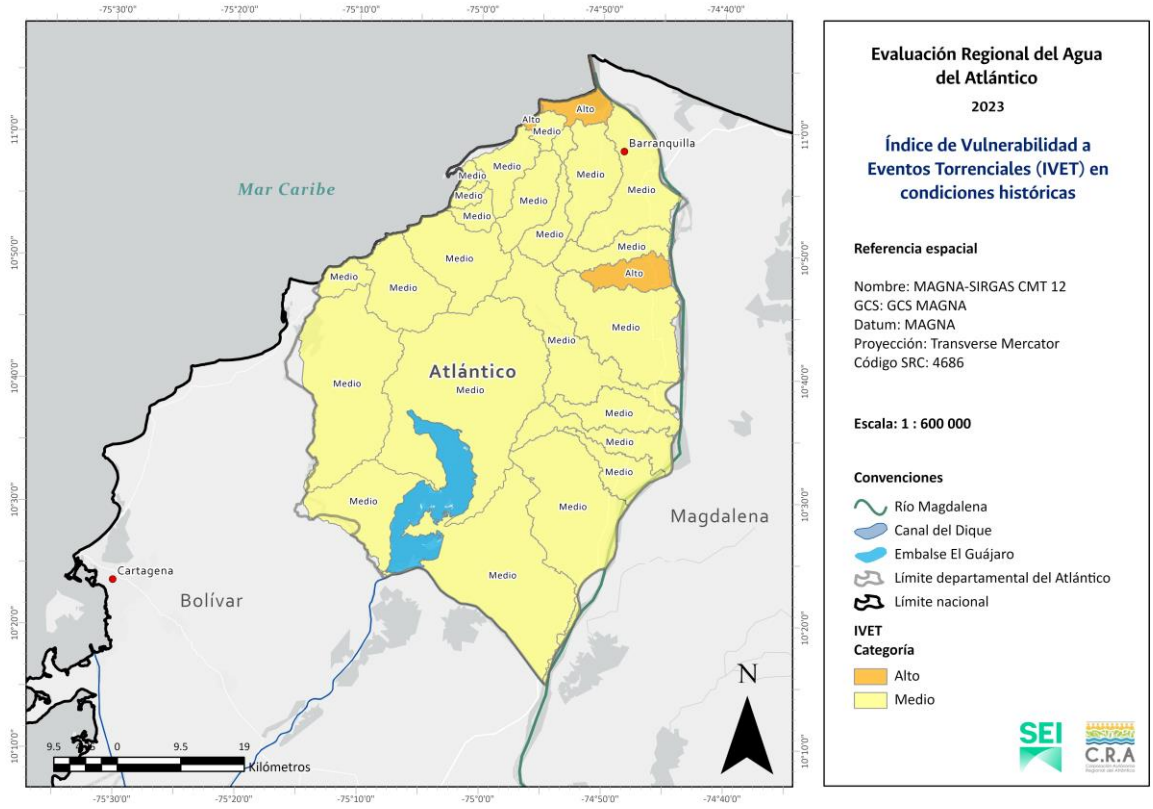


Figura 110. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) en condiciones históricas.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del IVET muestran que, en general, el Departamento del Atlántico tiene una vulnerabilidad a eventos torrenciales moderada y solo es alta en tres subcuencas: MA3 – Ciénaga El Convento, CI6 – Plano Costero y CI5 – Perdida Cantera. Esto se explica principalmente porque, a pesar de que el Departamento no sea vulnerable por características morfométricas (25 de las 26 subcuencas presenta una categoría baja en el índice morfométrico y solo la subcuenca Ciénaga el Convento presenta con un índice moderado), si tiene una vulnerabilidad a la variabilidad moderada a muy alta entre los caudales altos y bajos.

A continuación, se presenta un resumen los principales componentes para el cálculo del IVET.

Índice morfométrico

El índice morfométrico de cada subcuenca se determina a partir de una matriz de decisión cuyos ejes corresponden a categorías del coeficiente de compacidad de Gravelius, de la pendiente media y de la densidad de drenaje de la respectiva subcuenca. Las categorías de cada una de estas componentes las estableció el IDEAM (IDEAM, 2013) y se sintetiza en la Figura 111. A partir de estas categorías, la matriz de decisión para determinar el índice morfométrico se presenta en la Figura 112. La información para el cálculo de estas categorías para cada una de las subcuencas de este estudio se encuentra en la Tabla 10.

Índice morfométrico	Escala	Área de la cuenca de drenaje (km^2)	Categorías				
			1	2	3	4	5
Densidad de drenaje (km/km2)	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	

Figura 111. Relaciones para categorizar los distintos componentes del índice morfométrico.
Fuente: IDEAM (2013).

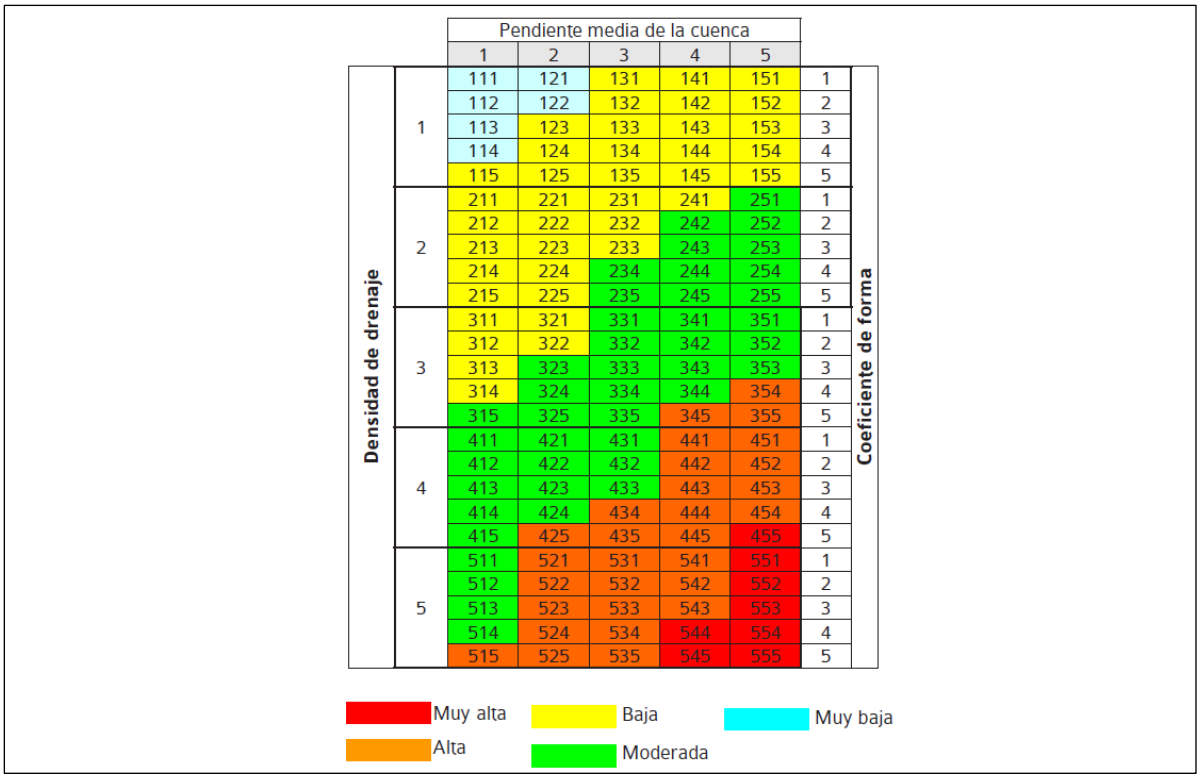


Figura 112. Relaciones entre componentes para determinar el índice morfométrico.
Fuente: IDEAM (2013).

Respecto al coeficiente de compacidad de Gravelius, este corresponde a un coeficiente adimensional que caracteriza la forma del área aportante al cierre de la subcuenca a partir de la razón entre el perímetro de esta y el perímetro de un círculo de igual área a la de la subcuenca. El coeficiente de compacidad de Gravelius toma valores mayores a 1, donde un valor 1 representa una forma redonda, resultando en una mayor tendencia a crecientes o concentración de altos volúmenes de aguas de escorrentía. Valores mayores a 1 representan geometrías irregulares.

Respecto a la pendiente media, esta corresponde a la variación de la inclinación dadas en el relieve de una zona y permite definir características de erosión o sedimentación de las capas de suelo, puesto que, en zonas de altas pendientes se presentan con mayor frecuencia los problemas de erosión; mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación.

Respecto a la densidad de drenaje, esta corresponde a la razón entre la longitud total de los cursos de agua dentro del área aportante al cierre de la subcuenca y su área total, y permite tener un conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje.

Los 3 componentes del índice morfométrico se calcularon en ArcGIS en base al mapa de elevación digital de Mazpen Terrain Tiles, presentado en la sección 3.1.1, y los polígonos de cada una de las subcuencas delimitadas en este estudio, presentadas en la sección 3.1.6.

Índice de variabilidad

El índice de variabilidad evalúa las diferencias existentes entre caudales máximos y mínimos en una unidad hidrológica o subcuenca. En este sentido, las subcuencas que muestran una variabilidad

pequeña en los caudales son aquellas que tienden a mantener caudales y flujo constante por sus cauces. Este indicador se determina siguiendo la ecuación:

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

donde Q_i y Q_f corresponden a dos valores dentro de la curva de duración de caudales, y X_i y X_f los porcentajes de excedencia correspondientes a los cuales escogidos. Esta ecuación asume que la curva de excedencia evaluada en términos logarítmicos tiene una tendencia lineal. La Tabla 54 presenta la clasificación para cada uno de los valores del índice de variabilidad.

Tabla 54. Clasificación del índice de variabilidad.

Pendiente	Vulnerabilidad
0 – 10	Muy Baja
10 – 37	Baja
37 – 47	Media
47 – 55	Alta
> 55	Muy alta

Fuente: IDEAM (2013).

9. Resultados de la Evaluación Regional del Agua

En esta sección se presentan los resultados de los indicadores obtenidos para todos los escenarios de modelación propuestos y detallados en la sección 6, a excepción del IVICAS, el ICA y el IMA, los cuales son independientes al clima y a la presión ejercida por las demandas incluidas en el modelo ERA-CRA (ver sección 8). Al final de esta sección se presenta una síntesis con los resultados de todos los indicadores para cada subcuenca mediante mapas de calor y ahondando en la situación del Departamento del Atlántico para cada una de las categorías en las que se divide la ERA. Es importante mencionar que el escenario climático, en sus dos períodos futuros, no corresponden a una proyección ni predicción, sino que a un potencial escenario pesimista para el Departamento.

9.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)

Al ser el IRH un indicador del sistema hídrico natural, por lo tanto, se evalúa únicamente en escenarios sin demandas. El IRH presenta los mismos resultados tanto en el escenario de concesiones como en el escenario potencial de demandas para una misma caracterización climática. En consecuencia, el IRH varía únicamente entre escenarios de clima o períodos de modelación. La Figura 113 presenta los resultados del IRH para los tres escenarios de clima propuestos.

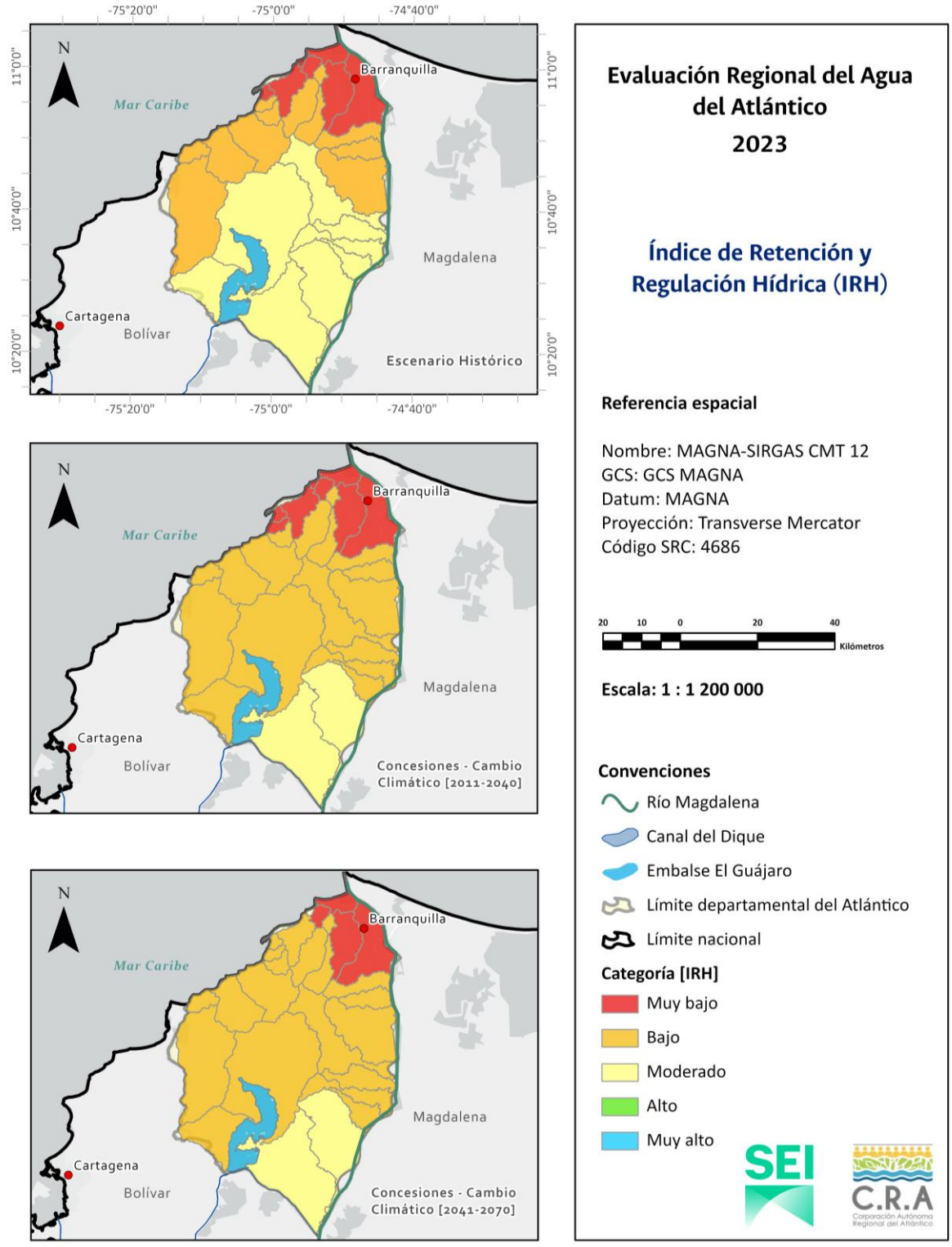


Figura 113. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) para los tres escenarios de clima.
Nota: Los resultados del IRH son independientes del escenario de demandas.
Fuente: Elaboración propia.

Para el periodo 2011 – 2040 se observan variaciones significativas en el Departamento del Atlántico respecto al período histórico (1993 – 2022), en donde la mayoría de las subcuencas que se encontraban con una regulación media, pasarán a tener una capacidad de retención y regulación de

la humedad del suelo baja al verse altamente afectadas por la disminución en la precipitación. Únicamente las subcuencas localizadas en la zona suroriental del Departamento se mantendrán con una regulación media al ser estas las menos afectadas en el balance hídrico general y tener menor porcentaje de disminución en la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía y la infiltración. Para el periodo 2041 – 2070 se espera una situación muy similar al periodo 2011 – 2040, sin embargo, la variación entre caudales altos y bajos será menor al haber menor precipitación, por lo tanto, menor oferta disponible y menor cantidad de agua en los periodos de lluvia como octubre y noviembre.

9.2. Índice de Aridez (IA)

Al igual que para el IRH, el IA pertenece a los indicadores del sistema hídrico natural, por lo que los resultados entre escenarios solo variarán respecto al clima y no respecto a las demandas, por lo tanto, los resultados serán iguales en los escenarios concesiones y potencial de demandas. La Figura 114 presenta los resultados del IA para los tres escenarios de clima.

Históricamente el Departamento del Atlántico se clasifica como árido al existir déficit de precipitación para el sostenimiento del ecosistema. En los escenarios futuros analizados, la tendencia indica una disminución y un aumento en temperaturas. En consecuencia, habrá un aumento en la capacidad de la atmósfera en captar humedad y menor disponibilidad de agua. Esto resulta en que la evapotranspiración potencial disminuye menos que la disminución en precipitación, y es la escorrentía e infiltración lo que compensa el desbalance hídrico.

Para el escenario de cambio climático 2011 – 2040 se observa un mayor déficit en las subcuencas de la subzona hidrográfica Magdalena localizadas en el centro-occidente del Departamento. A pesar de que el aumento en temperatura es mayor en la zona sur, la precipitación se ve menos afectada, por lo cual habrá mayor suficiencia. Sin embargo, en el periodo 2041 – 2070 la situación es crítica. Se observa que casi todo el Departamento se encontrará con un alto déficit de precipitación para satisfacer las necesidades hídricas que requiere el tipo de cobertura. Ante este escenario, es importante potenciar a futuro coberturas con mayor tolerancia al estrés hídrico en todo el Departamento o planificar estrategias de riego que aprovechen de mejor manera el recurso hídrico.

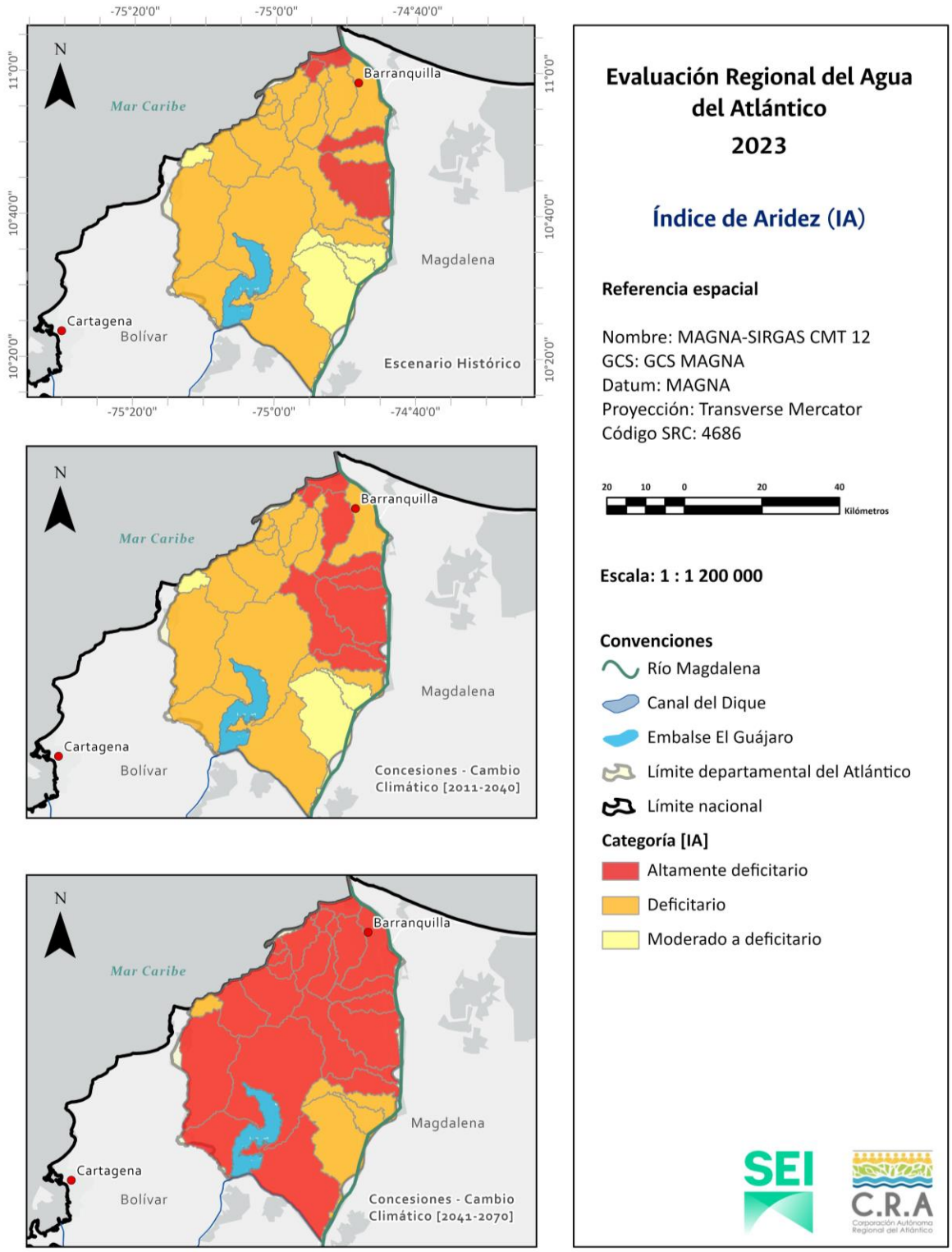


Figura 114. Índice de Aridez (IA) para los tres escenarios de clima.
Nota: Los resultados del IRH son independientes del escenario de demandas.
Fuente: Elaboración propia.

9.3. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA)

En el Departamento del Atlántico, las extracciones de agua superficial más importantes en volumen se realizan desde el río Magdalena, el embalse El Guájaro y el canal del Dique. El cálculo del IUA considera únicamente las extracciones desde las fuentes superficiales dentro de los límites de las subcuencas delimitadas en el Departamento. La Figura 115 y Figura 116 presentan los resultados del IUA para condiciones para los tres escenarios de clima en condiciones de año medio y seco, respectivamente. En esta sección se presentan únicamente los resultados del IUA para el escenario concesiones y en la siguiente se presentan los resultados del IUA para el escenario potencial de demandas, que equivalente a la definición de Índice Escasez.

Para los escenarios de cambio climático, en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, no se observan grandes cambios respecto al período histórico (1993 – 2022). Para el periodo 2011 – 2040, la subcuenca CA3 – Arroyo Caimán pasa de una clasificación del IUA alta a una muy alta. Por otro lado, para el periodo 2041 – 2070 las subcuencas CA1 – Ciénaga Balboa y Arroyo grande y DI1 – Occidental Embalse El Guájaro pasan de una categoría baja a moderada, mientras que la subcuenca CI1 – San Luis pasa de una categoría moderada a alta. Todo esto producto de la disminución en la oferta y el aumento de la población.

Para condiciones de año seco, el IUA cambia principalmente para las subcuencas localizadas en las subzonas hidrográficas Caribe y Mallorquín, mientras que las subcuencas de las subzonas del Magdalena y Canal del Dique no presentan cambios considerables respecto a un año promedio. Las subcuencas de las subzonas Caribe y Mallorquín, en general, presentan un IUA moderado a alto y muy alto, siendo las de mayor uso las subcuencas CI2 – Oriental Pan de azúcar y CA3 – Arroyo Caimán. Esta última subcuenca presenta una situación crítica para los escenarios de cambio climático 2011 – 2040 y 2041 – 2070 donde la demanda es mayor que la oferta disponible. En general, para estos periodos de cambio climático no se encuentran mayores diferencias en cuanto a la clasificación del IUA respecto al periodo histórico.

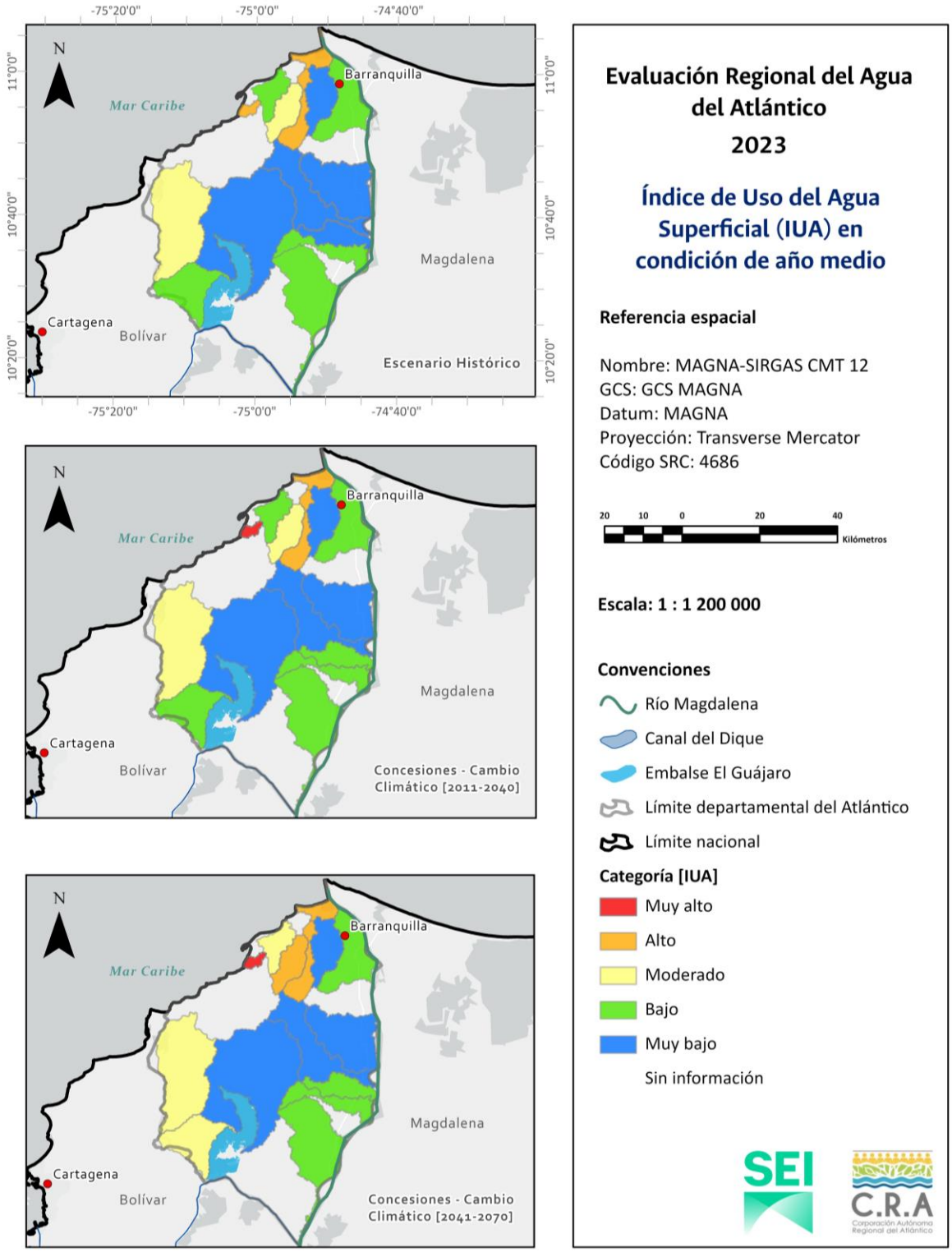


Figura 115. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones.
Fuente: Elaboración propia.

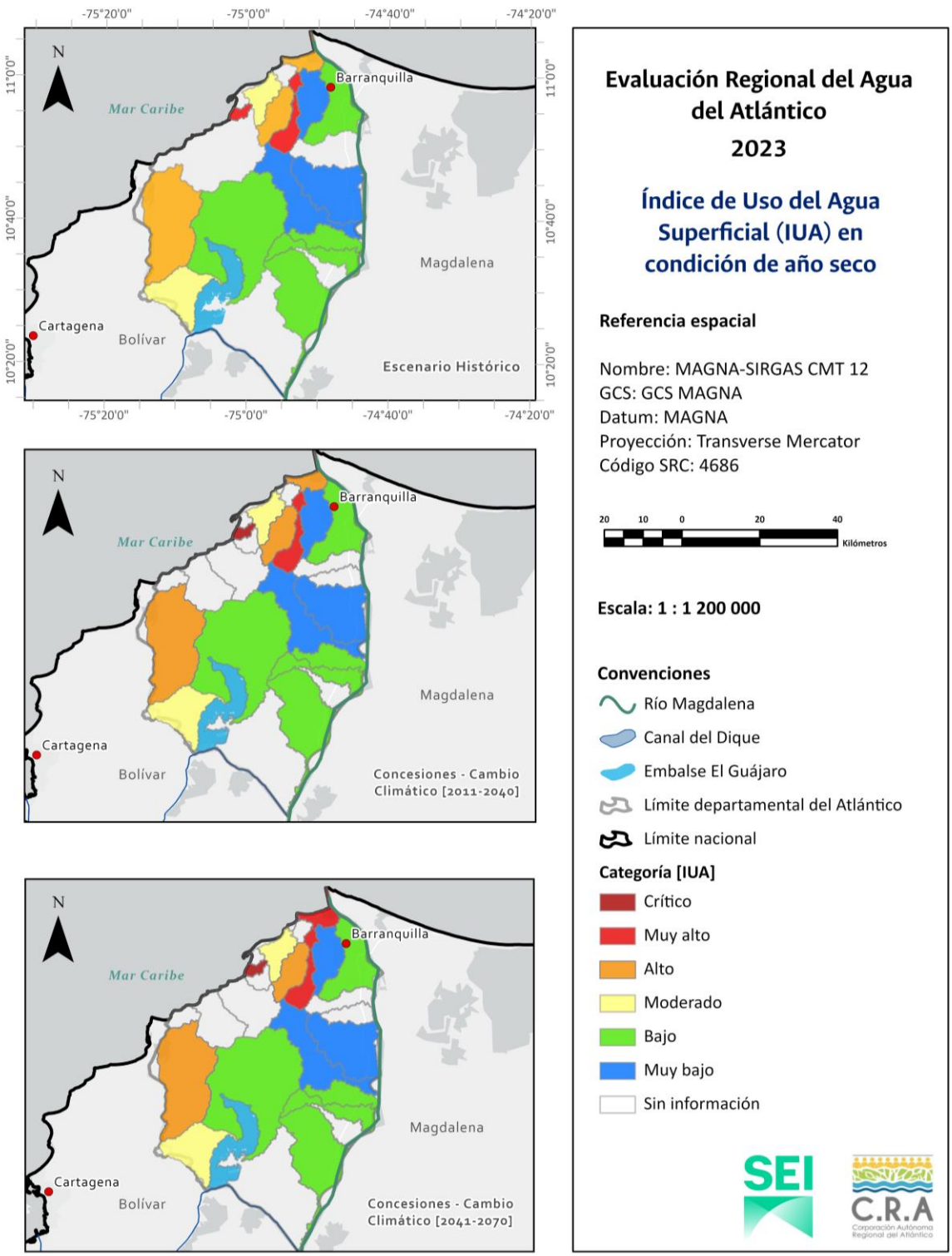


Figura 116. Índice de Uso del Agua Superficial (IUA) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones.
Fuente: Elaboración propia.

9.4. Índice de Escasez (IE)

El Índice de Escasez (IE) de agua se define como la relación porcentual entre la demanda potencial de agua del conjunto de actividades sociales y económicas con la oferta hídrica superficial disponible. El IE considera la cantidad de agua potencial que no es contabilizada y se requiere para satisfacer los diferentes requerimientos de la región. En otras palabras, este índice se calcula igual que el IUA, pero considerando el escenario de demanda potencial definido en las secciones 5.4 y 6. La Figura 117 y Figura 118 presentan los resultados del IE para los tres escenarios de clima en condiciones de año medio y seco, respectivamente.

En condiciones de año medio, el IE presenta una condición crítica para las subcuencas MA2 – Ciénaga de Malambo, MA11 – Ciénaga Uvero 2 y DI1 – Occidental Embalse El Guájaro, donde puede existir conexiones de agua ilegales relacionadas con los usos doméstico, agrícola y pecuario si se compara con el IUA (demandas en base a concesiones). Se recomienda en estas zonas hacer visitas y reconocimientos que permitan identificar usuarios de agua superficial no reglamentados y eventualmente usuarios que estén interesados en solicitar concesiones, para poder evaluar su factibilidad o un plan de acción para abastecerlos.

Para los escenarios de cambio climático 2011 – 2040 y 2041 – 2070 no se observan grandes diferencias en el IE respecto al escenario histórico. En estos escenarios únicamente se evidencian cambios en las subcuencas CA3 - Arroyo Caimán y CI2 – Oriental Pan de Azúcar, que pasan de tener un IE alto a muy alto y la subcuenca MA9 – Ciénaga Ponedera pasa de un índice bajo a moderado.

Para condiciones de año seco, el IE aumenta una categoría en la mayoría de las subcuencas. En general, se observa un IE de moderado a critico en el norte y el sur del Departamento, mientras que en la zona centro el IE se mantiene en las subcuencas de la subzona Magdalena entre muy bajo y moderado a medida que se desplaza al norte o al sur. Para los escenarios de cambio climático no se evidencian cambios en las categorías de este índice respecto al periodo histórico.

Es importante mencionar que las subcuencas CA5 – Arroyo Juan de Acosta y MA3 – Ciénaga El Convento no tienen demanda potencial en fuentes superficiales. Las extracciones de agua en estas subcuencas vienen totalmente de agua subterránea, y según conversaciones con la CRA, a futuro no se espera que en estas subcuencas se otorguen concesiones en fuentes superficiales.

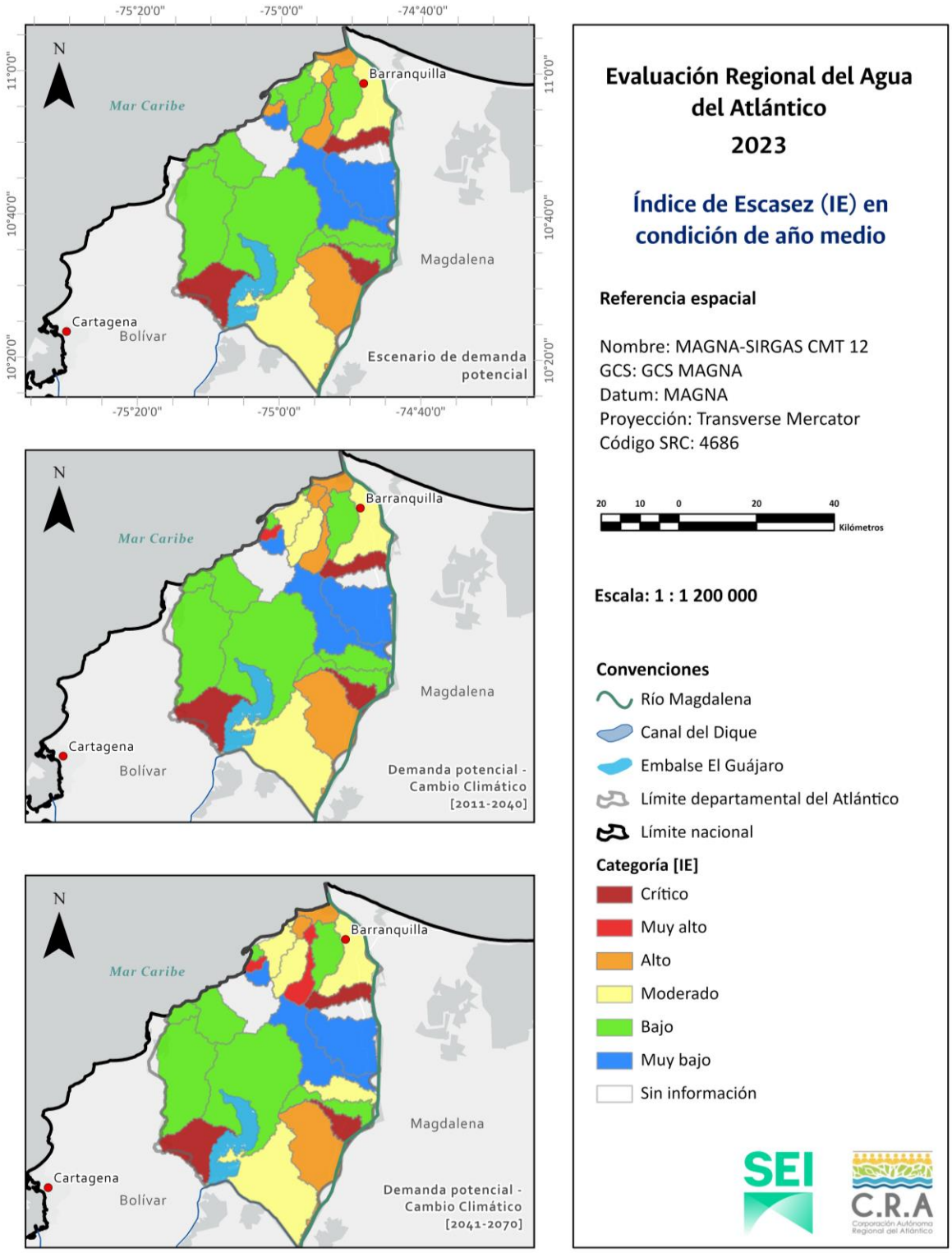


Figura 117. Índice de Escasez (IE) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

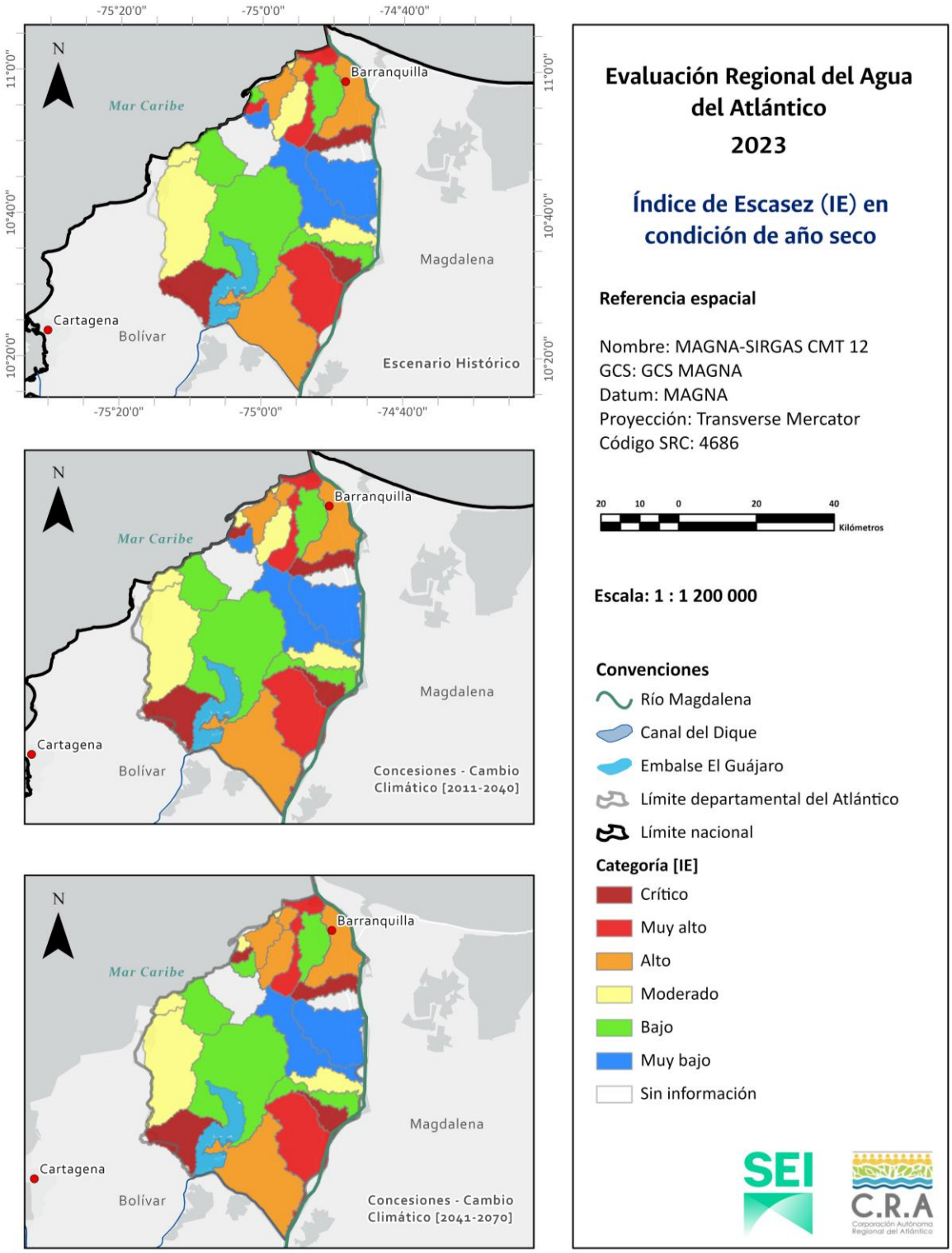


Figura 118. Índice de Escasez (IE) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

9.5. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS)

En el Departamento del Atlántico la presión sobre el agua subterránea para un año promedio de lluvias es alta en la zona nororiental, cercana al río Magdalena, y baja en el resto del Departamento. Detalles del análisis en el período histórico se presenta en la sección 8.2.2. La Figura 119 presenta los resultados del IEAS para los tres escenarios de clima en condiciones de año medio.

Respecto a los escenarios de cambio climático, para condiciones de año medio en el escenario de demandas por concesiones, se evidencia que solo ocurren cambios en la zona norte del Departamento. Para el periodo 2011 – 2040, la subcuenca CI2 – Oriental Pan de Azúcar pasa de un IEAS bajo a moderado, CA4 – Arroyo caja de un IEAS moderado a alto y la subcuenca CI3 – Arroyo hondo pasa a tener un IEAS muy alto. Para el periodo 2041 – 2070 las subcuencas MA1 – Urbano y Ciénaga La Bahía y CI6 – Plano Costero presentarán una presión muy alta sobre el agua subterránea al disminuirse considerablemente la recarga por precipitación en esta zona.

Considerando que la evaluación sobre el agua subterránea es vital en el Departamento del Atlántico, en la Figura 120 se presenta la evaluación de la demanda potencial que existiría sobre el agua subterránea considerando los tipos de cobertura y módulos de consumo para diferentes usos en condiciones de año medio.

Para el escenario de demanda potencial en condiciones de año medio se observa una gran diferencia entre la zona occidental, en las subcuencas de la subzona Caribe, y la zona oriental del Atlántico, en las subcuencas de las subzonas Magdalena y Mallorquín, en todos los periodos de clima. Esto se debe principalmente a que la zona oriental se caracteriza por tener mayor extracción de agua para usos como domestico rural, pecuario y agrícola a diferencia de la occidental que hace mayor presión sobre fuentes superficiales.

En general, las subcuencas de la subzona del Magdalena tienen una presión alta (3 subcuencas de 9) a crítica (4 de 9, 3 de ellas al norte) y solo MA9 – Ponedera y MA10 – Ciénaga Uvero presentan una presión baja. En la subzona hidrográfica Mallorquín sucede algo similar a la del Magdalena. La subcuenca CI1 – San Luis y CI5 – Perdida Cantera tienen un IEAS bajo, la subcuenca CI6 – Plano tiene una presión crítica y las 3 subcuencas restantes una presión alta. En la subzona hidrográfica Caribe, solo la subcuenca CA7 – Galerazamba presenta una situación crítica, la subcuenca CA4 – Arroyo caja una presión moderada y las demás subcuencas presentan un índice bajo a muy bajo. Finalmente, en las subcuencas de la subzona del canal del Dique, la zona occidental presenta una presión sobre el agua subterránea baja, la zona oriental moderada, y la zona Norte una presión muy alta.

En el escenario de cambio climático 2011 – 2040 se espera para la demanda potencial, en condiciones de año medio, que las subcuencas CA5 – Juan de Acosta y CA1 – Ciénaga Balboa y Arroyo grande, al tener menor oferta subterránea disponible, pasen de una clasificación baja a moderada. Finalmente, para el escenario 2041 – 2070 se espera que las subcuencas de la subzona Magdalena y Mallorquín, que se encontraban en una categoría alta, pasen a tener una categoría muy alta. Ante estos escenarios, tal y como se mencionó en el análisis del IUA, es importante que, en las subcuencas con presiones altas para el escenario de demanda potencial, se realicen visitas de campo de inspección y control en predios que pueden estar extrayendo agua subterránea de manera ilegal para diferentes actividades.

Para la evaluación del IEAS en condiciones de año seco, en la Figura 121 y Figura 122 se presenta la evaluación de este indicador para los escenarios de demanda con concesiones y demanda potencial respectivamente.

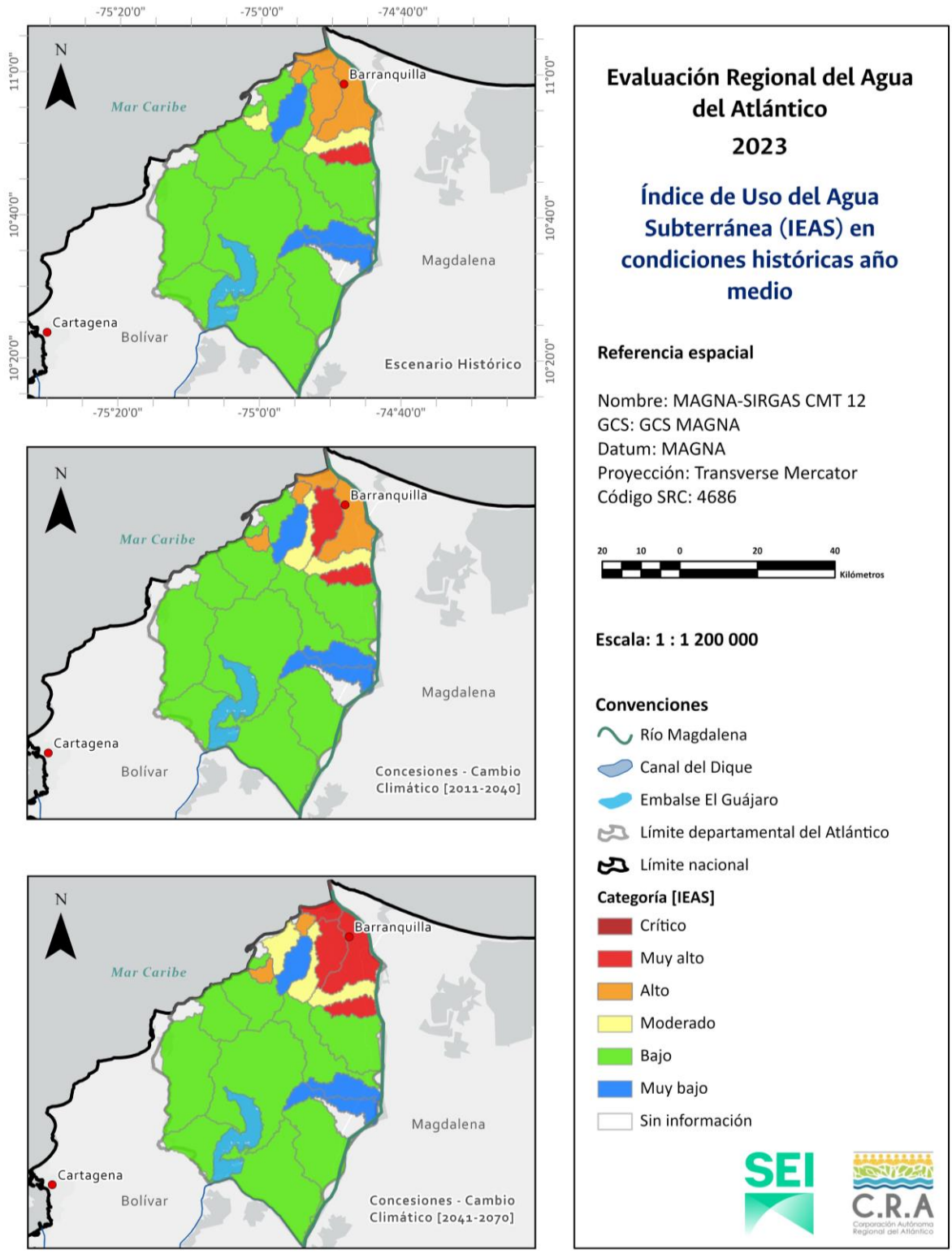


Figura 119. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones.
Fuente: Elaboración propia.

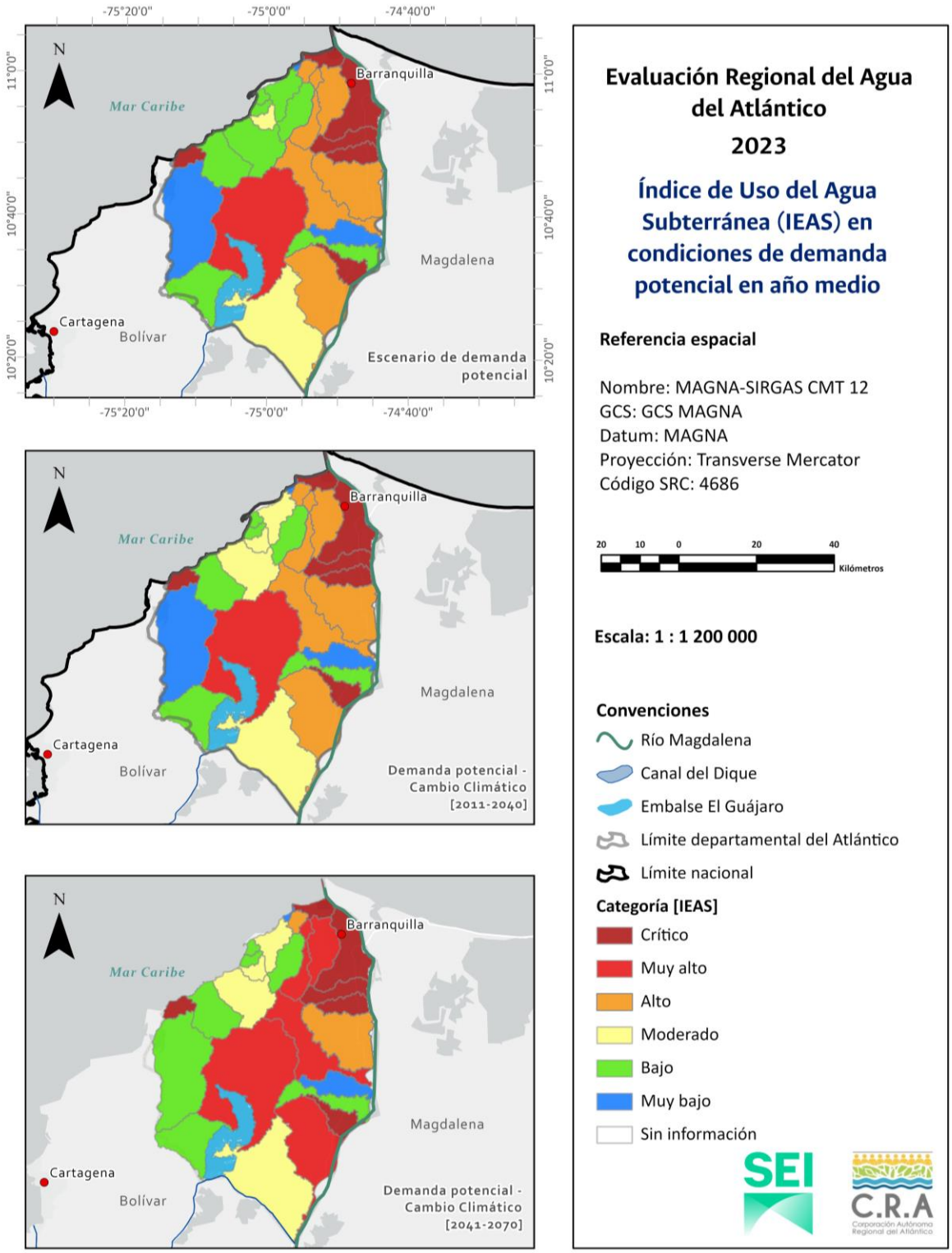


Figura 120. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

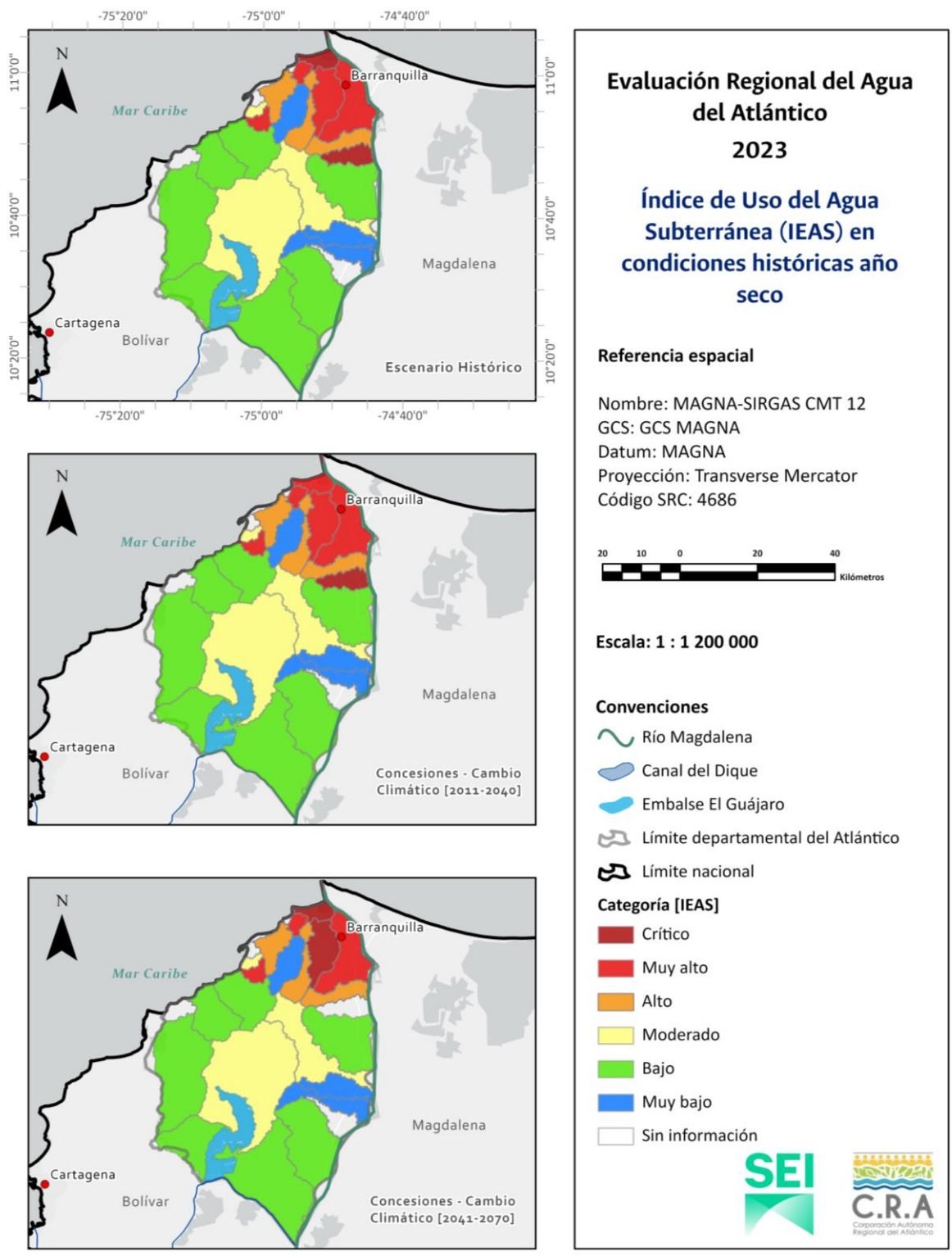


Figura 121. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones.
Fuente: Elaboración propia.

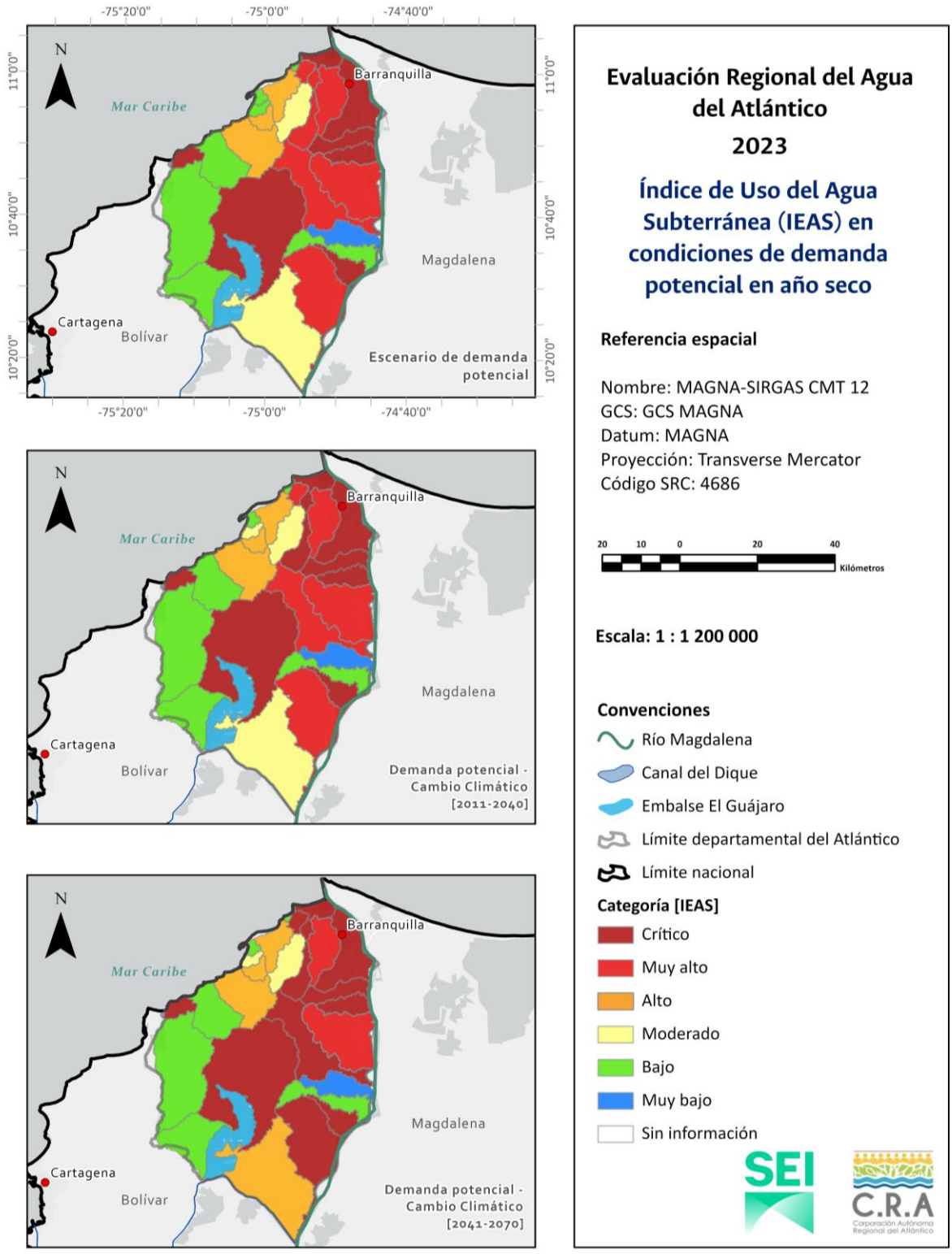


Figura 122. Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

En condición de año seco, para el escenario de demandas con concesiones, la extracción de fuentes subterráneas es alta a critica en la zona norte, y baja a moderada en el centro y sur del Departamento.

En los escenarios de cambio climático futuros, para un año no se evidencian cambios significativos en el Departamento respecto a lo que ocurre históricamente.

Finalmente, el escenario de demanda potencial presenta una situación de presión alta a critica en casi todo el Departamento en condiciones de año seco. Esta situación es más crítica para los escenarios de cambio climático donde en el periodo 2041 – 2070 se espera que 11 de las 26 subcuencas presenten una situación crítica donde no habrá suficiente oferta para satisfacer la demanda subterránea. Además, 6 subcuencas presentarán una presión alta a muy alta sobre las fuentes subterráneas. Esto es un indicador de que a futuro el Departamento puede presentar problemas de escasez si no se toman acciones relacionadas con la identificación de usuarios no reglamentados y las restricciones de uso del recurso en años donde se presente el fenómeno del niño.

9.6. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público con respecto al número de habitantes (IASAP)

En el Departamento del Atlántico no se hacen extracciones considerables de agua subterránea para uso doméstico en las cabeceras municipales (solo ocurren en subcuencas de la subzona Magdalena y Mallorquín), resultando como clasificación de IASAP insuficiente tal y como se detalló en la sección 8.2.3. En la Figura 123 y Figura 124 se presentan los resultados del IASAP en condiciones de año medio para los tres escenarios de clima en los escenarios de demanda por concesiones y demanda potencial respectivamente.

Para el escenario de demanda por concesiones el IASAP se clasifica como insuficiente para los dos escenarios de cambio climático. La única diferencia entre los escenarios de clima se refleja en los valores, siendo estos ligeramente menores al aumentar la población. El escenario de demanda potencial para el IASAP refleja la demanda bruta de agua que debe ser extraída (considerando perdidas del 30% en la conducción) para satisfacer la población, siendo está de un valor de 171.43 L/hab-dia, clasificándose el IASAP como muy alto. Para obtener una variación en su clasificación, sería necesario tener en cuenta restricciones de uso de agua en cada acuífero destinadas al uso público en las cabeceras municipales.

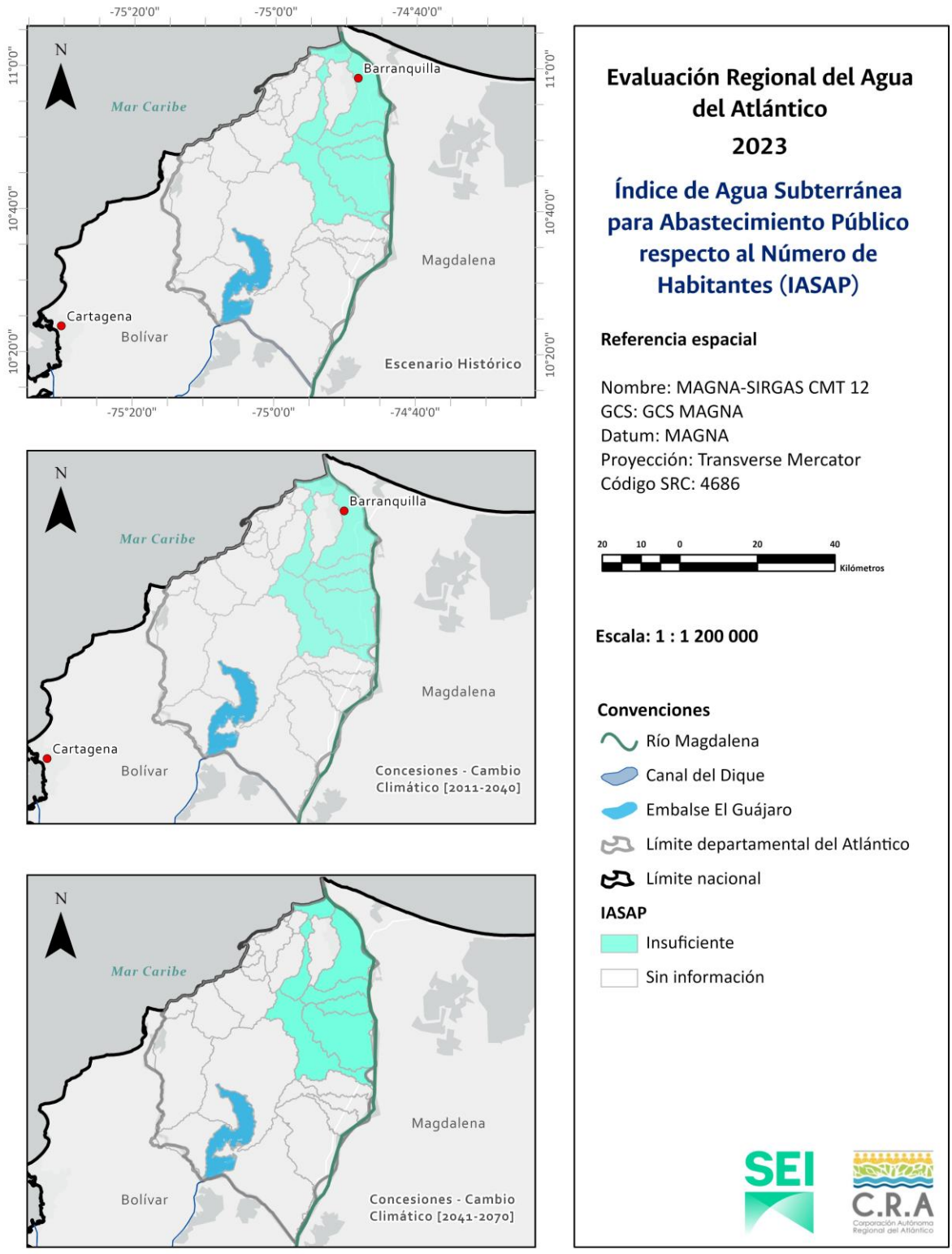


Figura 123. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público respecto al Número de Habitantes (IASAP) para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones.
Fuente: Elaboración propia.

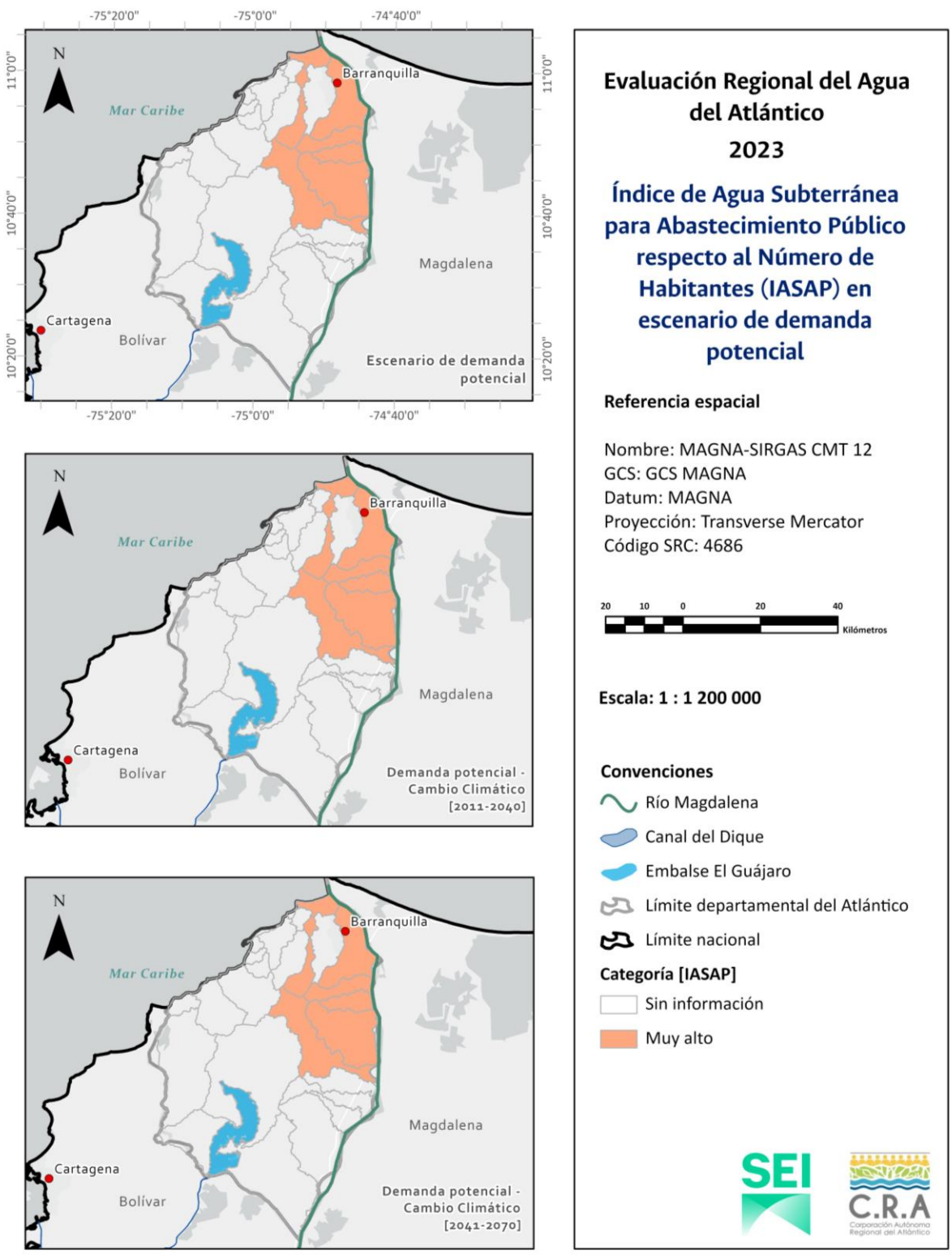


Figura 124. Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público respecto al Número de Habitantes (IASAP) para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

9.7. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA)

Para analizar el IIUA se deben considerar los resultados obtenidos en el IUA (superficial) y el IEAS (subterráneo), esto considerando que el IIUA evalúa la relación entre la demanda total sectorial y la oferta hídrica total disponible en una subcuenca. En la Figura 125 se presenta el resultado del IIUA para condiciones de año medio, considerando los tres escenarios de clima y el escenario de demanda por concesiones.

Para el escenario histórico de clima y demanda por concesiones, en condiciones de año medio, se evidenció en la sección 8.2.4 que las subcuencas MA3 – Ciénaga El Convento y CI6 – Plano Costero presentan una demanda sectorial alta para la oferta total disponible. Evaluando los escenarios de cambio climático, se espera para el periodo 2011 – 2040 que la subcuenca CA8 – Ciénaga del Totumo pase de una categoría baja a moderada y las subcuencas CA3 – Arroyo Caimán y CI2 – Oriental Pan de Azúcar de una categoría moderada a alta. Para el periodo 2041 – 2070 se espera que la subcuenca MA3 – Ciénaga El Convento presente un IIUA muy alto, esto relacionado totalmente con la presión sobre fuentes subterráneas, ya que allí no se presentan extracciones de tipo superficial, principalmente, porque la oferta superficial es muy baja.

Para evaluar la presión total potencial que existiría sobre la oferta hidria total disponible, en la Figura 126 se presenta el IIUA para el escenario de demanda potencial en condiciones de año medio.

Para el escenario demanda potencial y condiciones de año medio se espera que en el IIUA ocurra algo muy similar a lo que ocurre en el IEAS, a excepción de algunas subcuencas, presentándose una mayor presión sectorial sobre la oferta hídrica disponible en la zona oriental del Departamento. Para condiciones de clima histórico (1993 – 2022) las subcuencas MA1 – Urbano y Ciénaga La Bahía, MA2 – Ciénaga de Malambo y MA11 – Ciénaga Uvero 2 presentan un IIUA critico debido a la alta presión sobre las fuentes subterráneas, que la oferta superficial no logra satisfacer. Caso contrario ocurre en la subcuenca DI1 – Occidental Embalse el Guájaro, donde la presión sobre fuentes superficiales es crítica y la recarga subterránea no es suficiente para satisfacer la demanda potencial. Para los escenarios de cambio climático 2011 – 2040 y 2041 – 2070 solo se evidencian cambios significativos respecto al escenario histórico en las subcuencas CI – 6 Plano Costero y MA3 – Ciénaga El Convento donde la demanda superara la oferta total disponible.

Para condiciones de año seco, donde la oferta hídrica disponible es menor, se presenta en la Figura 127 el resultado del IIUA para los tres escenarios de clima, considerando demanda por concesiones.

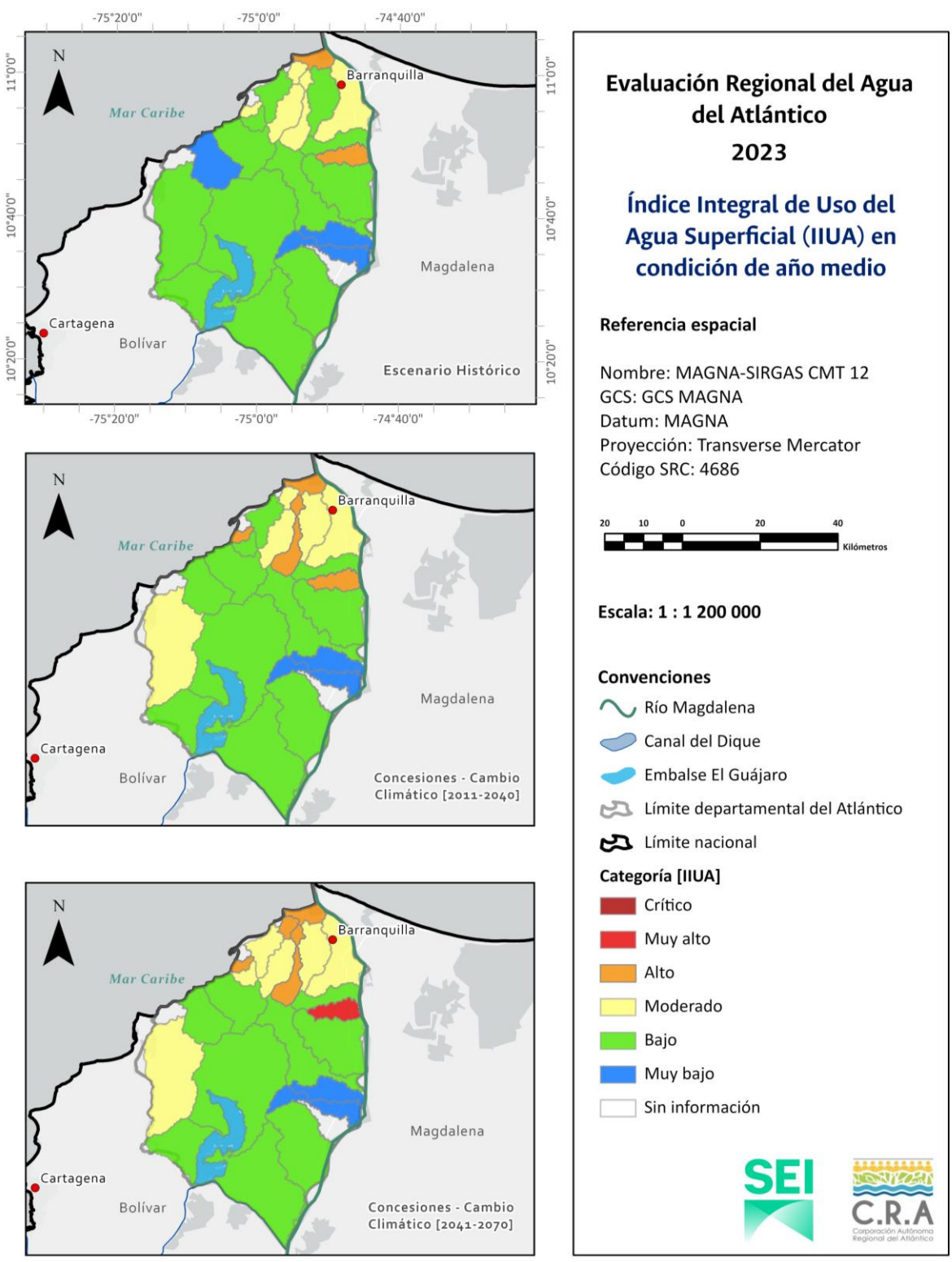


Figura 125. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones.
Fuente: Elaboración propia.

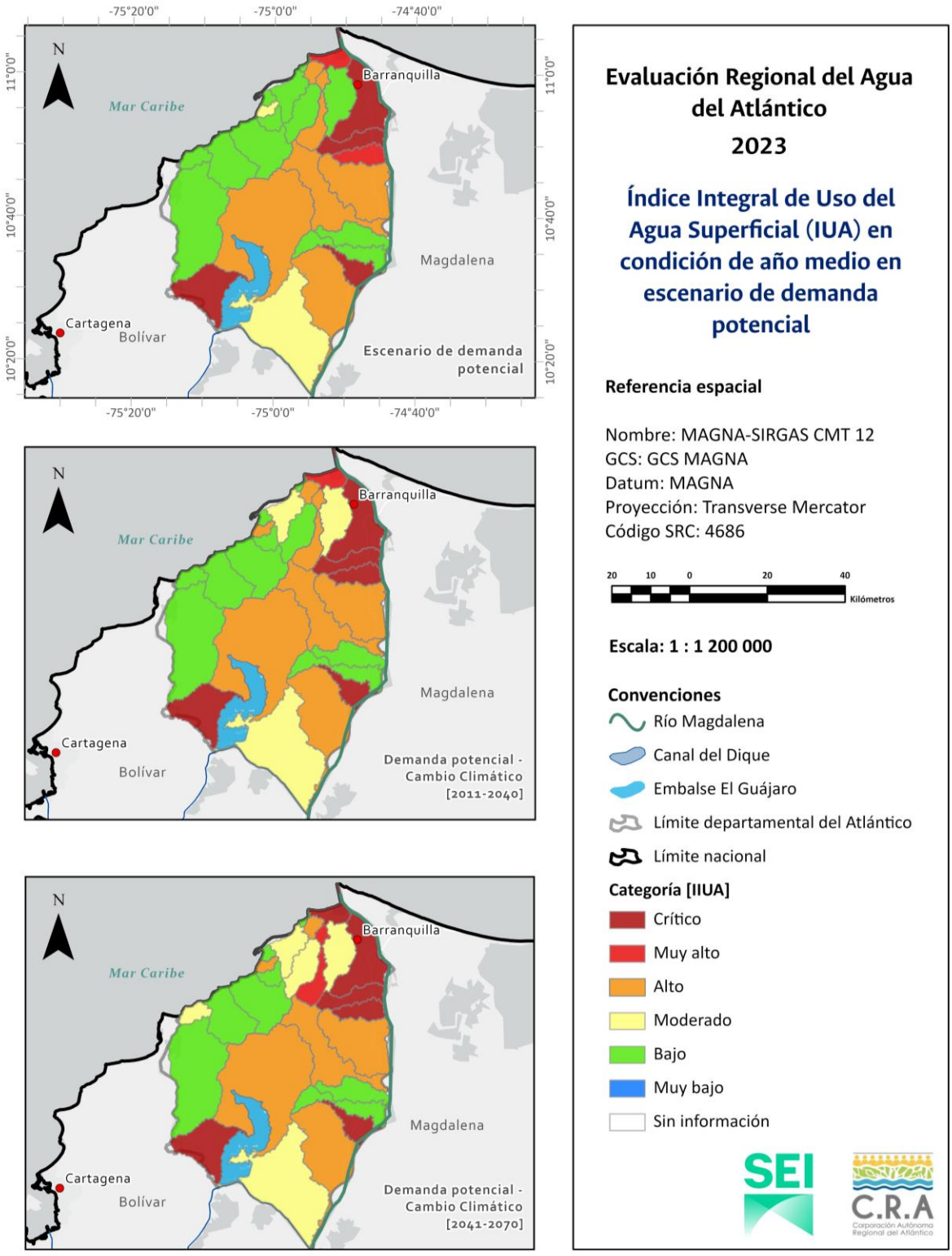


Figura 126. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.

Fuente: Elaboración propia.

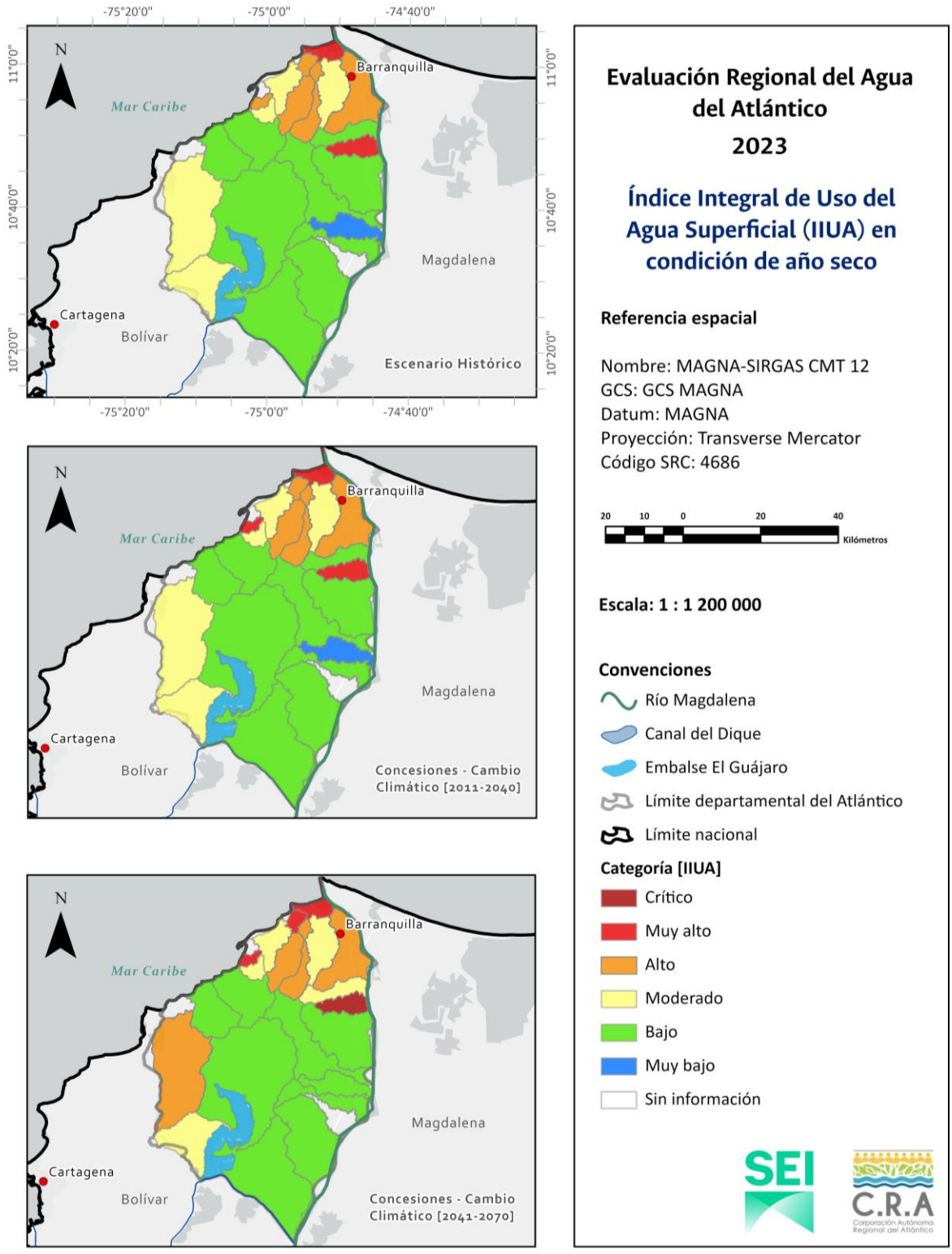


Figura 127. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y de demandas por concesiones.
Fuente: Elaboración propia.

Para un año seco, se espera que, en general, las subcuencas del norte del Departamento del Atlántico tengan una categoría más alta en la clasificación del IIUA, pasando de una presión baja a alta, a una moderada a muy alta. Lo mismo sucede con las subcuencas del suroccidente del Departamento CA3

– Ciénaga del Totumo y DI1 – Occidental Embalse El Guajaro donde el IIUA pasa de bajo a moderado. Para el escenario de cambio climático 2011 – 2040 se espera una condición muy similar al periodo histórico (1993 – 2022), mientras que para el escenario 2041 – 2070 la subcuenca MA3 – Ciénaga El Convento presentará una situación crítica y las subcuencas del suroccidente pasarán de una presión moderada a alta.

Para concluir este indicador, de acuerdo con el escenario potencial con condiciones de año seco que se ilustra en la Figura 128 se espera en gran parte del Departamento una presión alta a critica. Mientras en un año medio 12 subcuencas presentaban una situación alta a critica, en un año con fenómeno del niño 15 de las 26 subcuencas (58%) presentan una presión alta (6 de las subcuencas), muy alta (3 de las subcuencas) y crítica (6 de las subcuencas). Para el escenario de cambio climático 2011 – 2040 solo dos subcuencas tendrán cambios, variando de una categoría baja a moderada (CA4 – Arroyo Caja y CA5 – Arroyo Juan de Acosta), mientras que para el 2041 – 2070, la subcuenca CI2 – Oriental Pan de Azúcar tendrá una situación crítica.

Al igual que en el análisis del IUA, IE y IEAS, se recomienda tomar acciones que mejoren el uso del recurso en el Departamento, priorizando aquellas subcuencas que se presenten con una situación crítica, muy alta y alta.

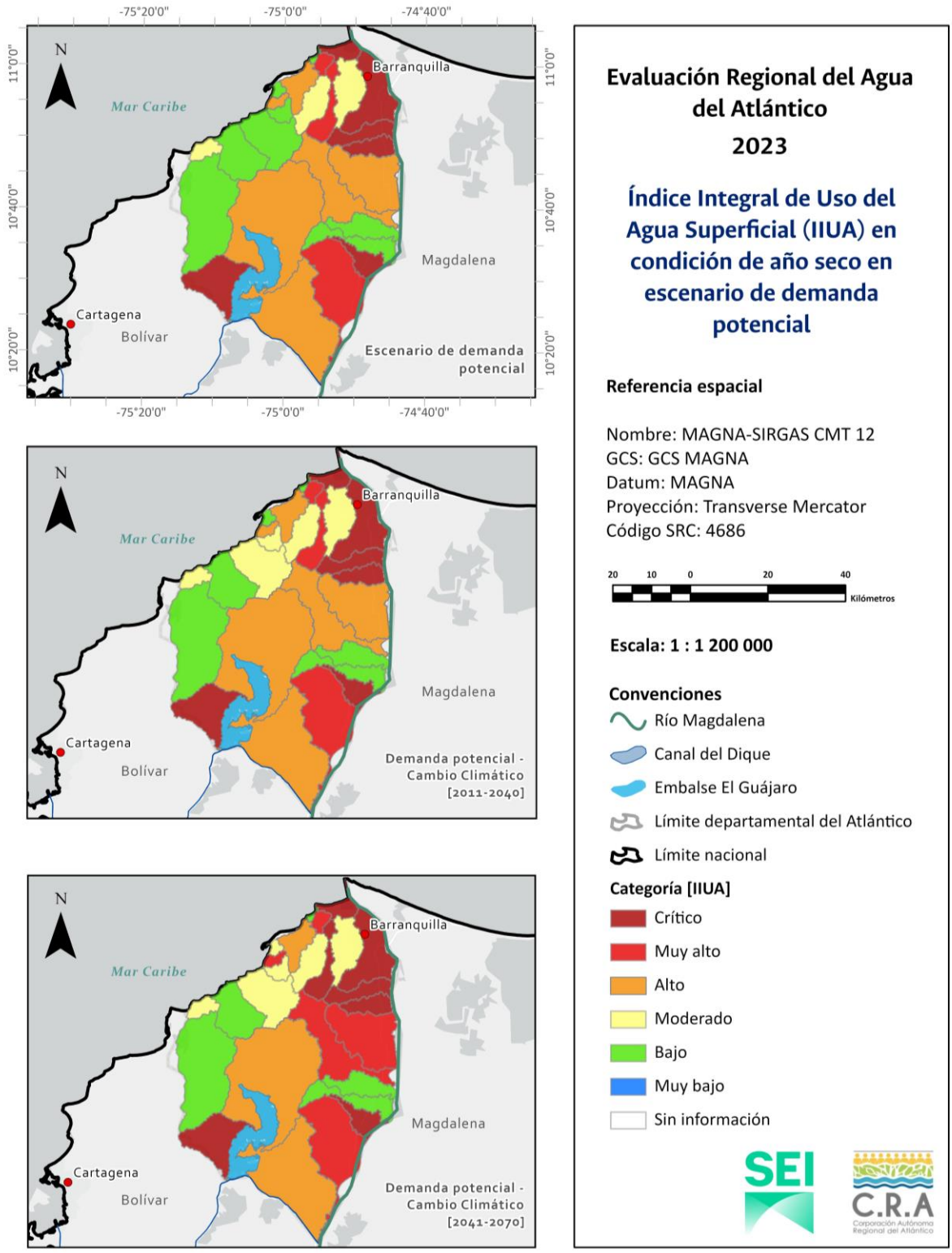


Figura 128. Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

9.8. Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL)

La calidad de agua del Departamento del Atlántico tiene alto potencial a ser contaminada debido a la baja oferta superficial que existe, como se presentó en la sección 8.3.2. Debido a que este indicador muestra la potencialidad del agua superficial a ser contaminada, y no si realmente está contaminada, para evaluar el estado actual de las fuentes superficiales se debe evaluar el Índice de Calidad del Agua (ICA). En la Figura 129 se presenta el IACAL para las demandas de agua potenciales y las cargas contaminantes que pueden generarse de acuerdo con las actividades productivas y sociales que ocurren en la jurisdicción. El crecimiento de la población y las actividades agrícolas y ganaderas pueden generar efectos negativos en la calidad del agua. Estos efectos son más críticos debido a la baja oferta de agua. Por lo tanto, se presentan para los tres escenarios climáticos i.e., histórico, cambio climático 2011 – 2040, cambio climático 2040-2070, condiciones de calidad de agua potencialmente críticas. Bajo los cambios en el clima esperados (disminución de la precipitación y en consecuencia, disminución del caudal), se espera que esta condición se acentúe aun más. Adicionalmente, la calidad del agua también puede potencialmente deteriorarse debido al aumento de la temperatura, afectando procesos físico-químicos (e.g., oxigenación del agua) y procesos biológicos.

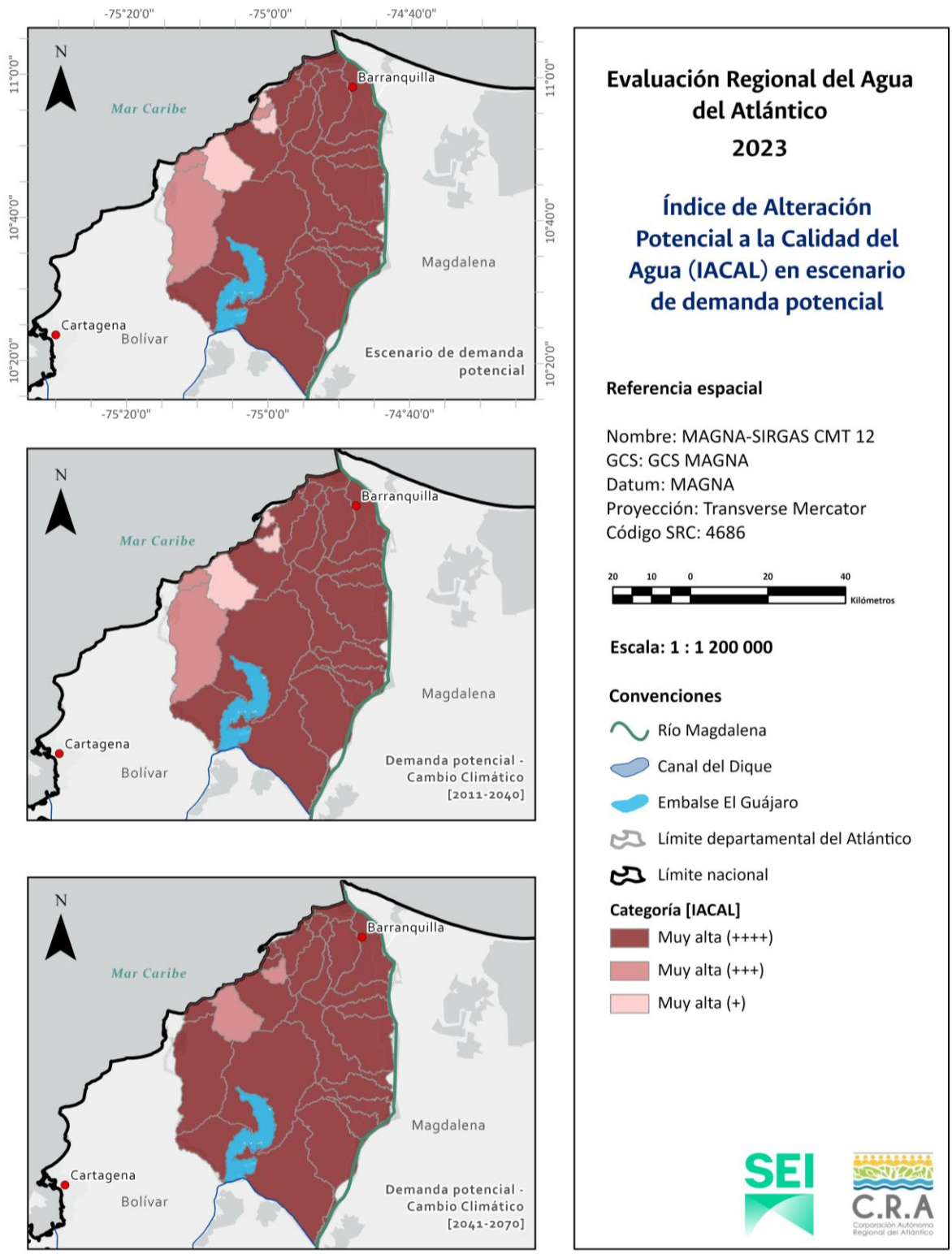


Figura 129. Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL) para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

9.9. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH)

El IVH relaciona el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) y el Índice del Uso de Agua Superficial (IUA) mediante una matriz en donde una subcuenca es más vulnerable al desabastecimiento hídrico si presenta una capacidad de retención y regulación del suelo baja y una presión sobre las fuentes superficiales alta.

Para el escenario de demanda por concesiones que se muestra en la Figura 130, con el clima histórico (1993 – 2022), se evidencia que las subcuencas que presentan una capacidad de retención baja o muy baja y una presión sobre el agua superficial moderada a muy alta tienen IVH alta a muy alta. La situación más grave ocurre en la subcuenca CI6 – Plano Costero, ubicada en la subzona hidrográfica Mallorquín, donde hay una capacidad de retención y regulación muy baja, sumado a una presión alta sobre las fuentes superficiales. Para los escenarios de cambio climático, en el período 2011 – 2040 solo se evidencian cambios significativos en la subcuenca CA3 – Arroyo Caimán, que tendrá una vulnerabilidad muy alta al desabastecimiento, y para el período 2041 – 2070 se espera que en general el Departamento se encuentre en una vulnerabilidad baja a moderada en las zonas centro y sur al oriente del Departamento (subzonas canal del Dique y Magdalena), y alta a muy alta en el occidente (subzona Caribe) y norte (subzona Mallorquín).

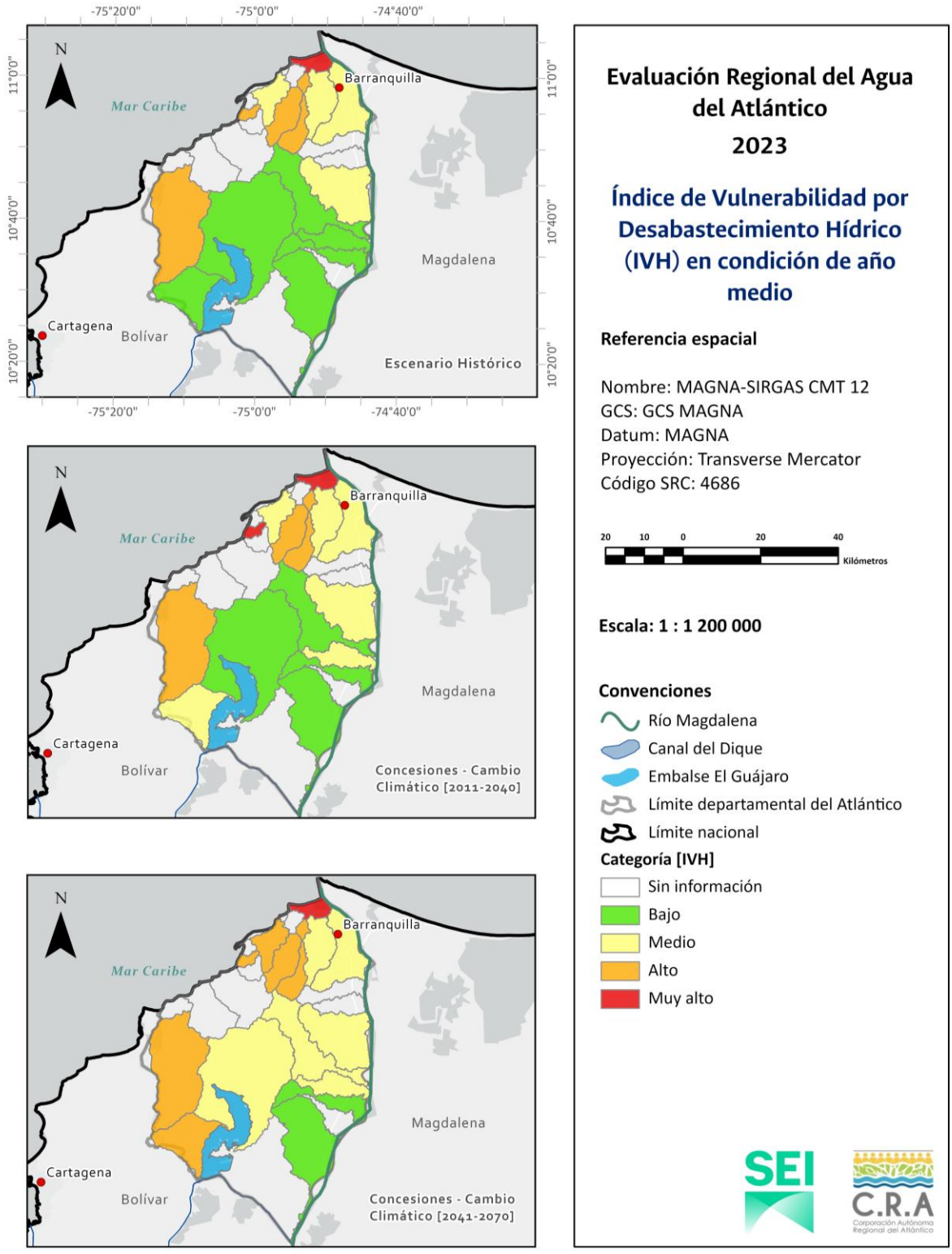


Figura *130. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones.*
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 131 se presenta el escenario de demanda potencial con condiciones de año medio para los tres escenarios de clima.

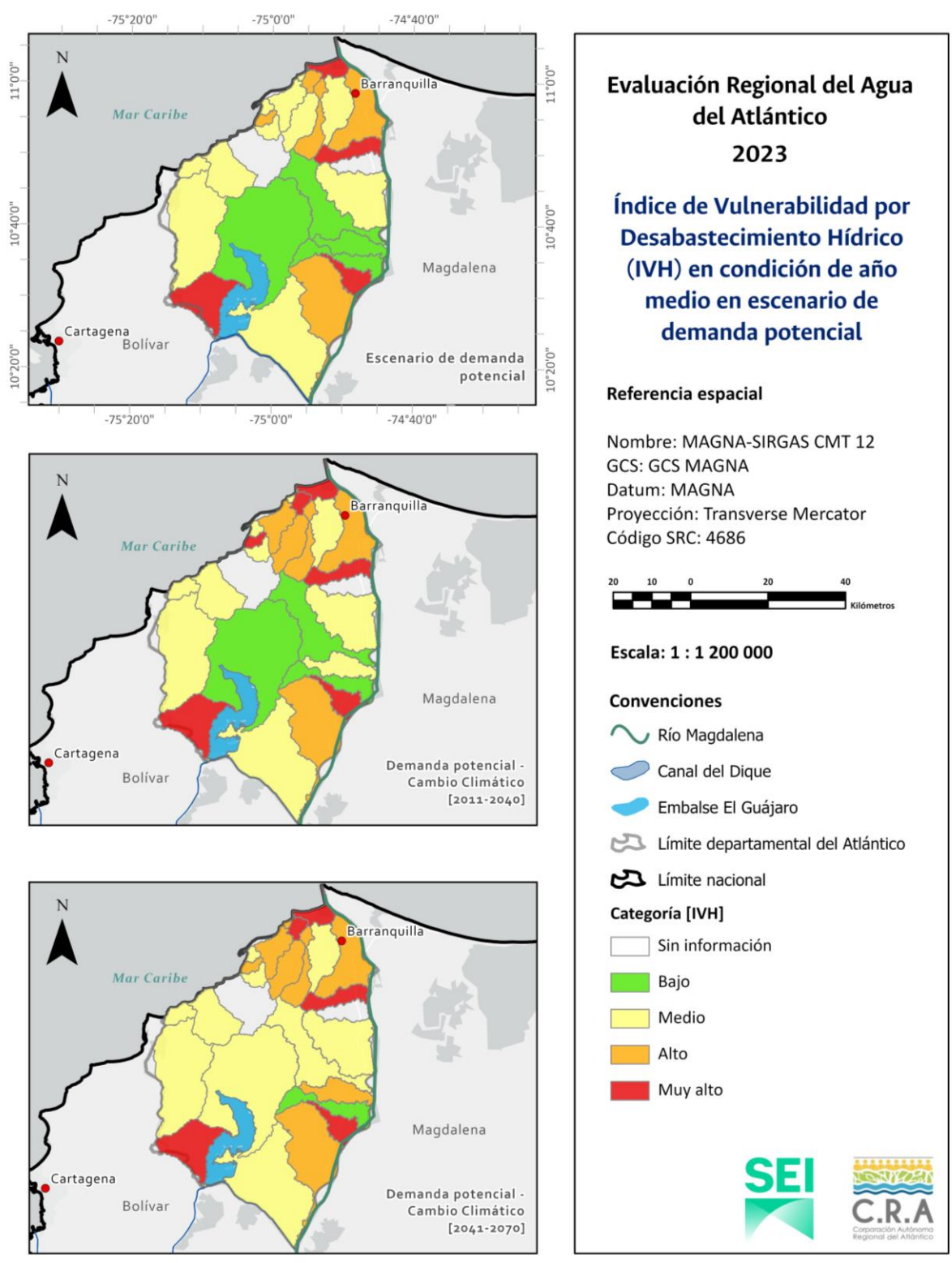


Figura 131. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condición de año medio para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

La única variable que tiene influencia sobre el IVH es el índice de uso del agua, considerando que la capacidad de retención y regulación de las subcuencas se calcula para un escenario natural que no tiene en cuenta la presión sobre el recurso. El clima histórico muestra que las subcuencas MA2 –

Ciénaga de Malambo, MA11 – Ciénaga Uvero 2 y DI1 – Occidental Embalse El Guájaro que presentan una presión crítica sobre el recurso, además de la subcuenca CI6 – Plano costero que tiene una presión muy alta, presente una vulnerabilidad al desabastecimiento muy alta. Para el resto del Departamento se presenta una variación de la vulnerabilidad entre las categorías baja, media y alta. A futuro, evaluando la demanda potencial, se espera que el Departamento presente una vulnerabilidad media a muy alta.

Para condiciones de un año seco, en el escenario de demanda por concesiones, que se ilustra en la Figura 132, no se evidencian variaciones significativas en la clasificación del IVH respecto a un año medio en ninguno de los tres escenarios de clima. Para el escenario de demanda potencial, ilustrado en la Figura 133, si se refleja que la mayoría del Departamento presenta una vulnerabilidad alta a muy alta. Para el clima histórico, 15 subcuencas tienen una vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico alta o muy alta, mientras que para el periodo 2011 – 2040 y 2041 – 2070, 17 tienen esta clasificación. Los resultados de este indicador reflejan la alta vulnerabilidad del Atlántico al desabastecimiento hídrico por fuentes superficiales ajenas al río Magdalena, canal del Dique y embalse El Guájaro.

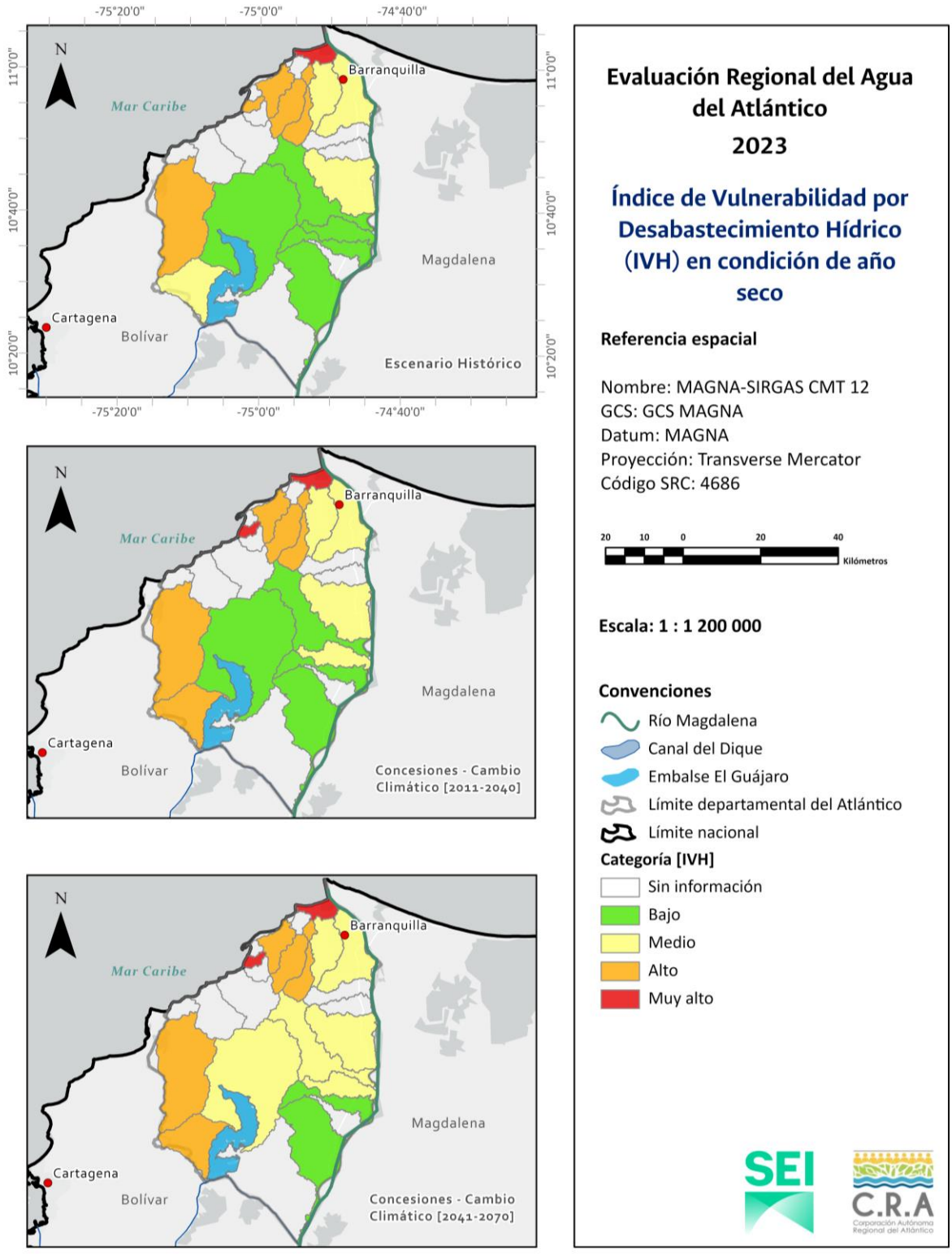


Figura 132. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condiciones de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demandas por concesiones.
Fuente: Elaboración propia.

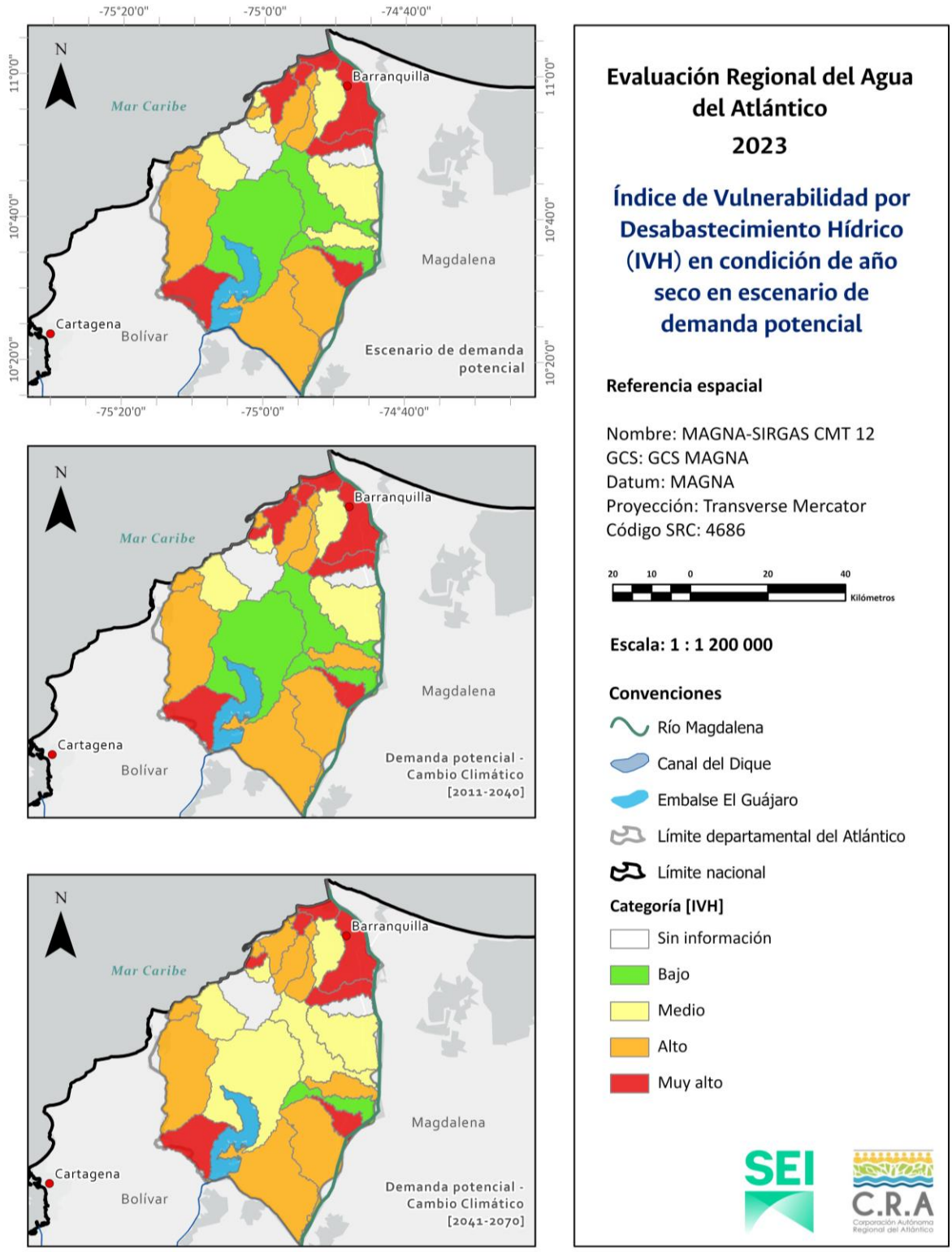


Figura 133. Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico (IVH) en condición de año seco para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

9.10. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)

El IVET está asociado directamente con parámetros morfológicos de cada subcuenca (densidad de drenaje, pendiente y coeficiente de compacidad), así como la variabilidad entre caudales altos y bajos. Considerando que este estudio no se enfoca en cambios relacionados con las características morfológicas del terreno, el IVET solo cambiará de acuerdo con la variabilidad de los caudales entre los diferentes escenarios.

El Departamento presenta una vulnerabilidad moderada a eventos torrenciales tanto para el escenario de demandas por concesiones como para el escenario potencial, como lo muestran la Figura 134 y Figura 135 respectivamente. Las subcuencas CI5 – Perdida Cantera, CI6 – Plano Costero y MA3 – Ciénaga El Convento presentan una alta vulnerabilidad a eventos torrenciales en el clima histórico. Se espera a futuro con los escenarios de cambio climático que estas subcuencas pasen de una clasificación alta a moderada debido a la reducción en la oferta, afectando principalmente los caudales altos y, por lo tanto, reduciendo la variabilidad entre caudales bajos y altos.

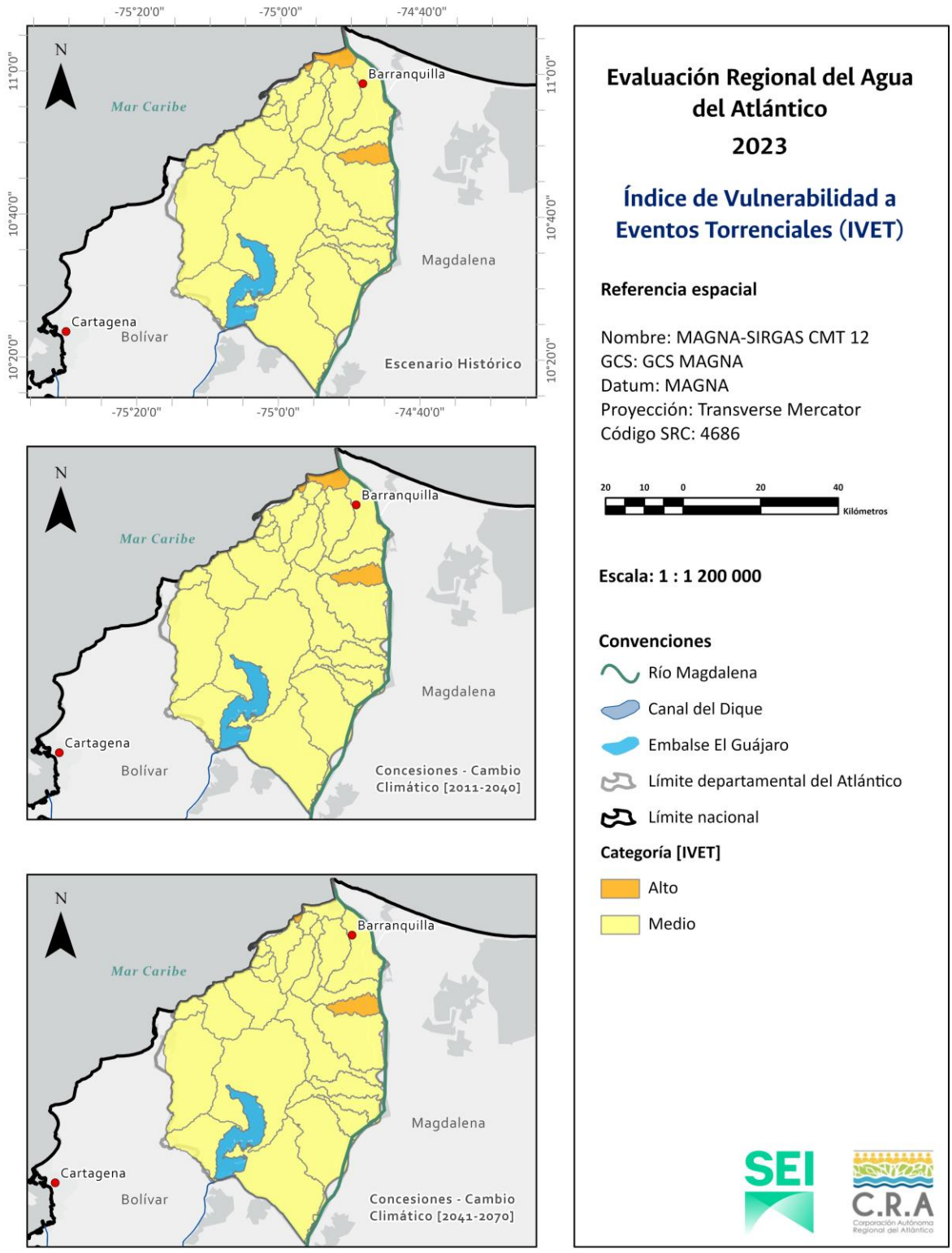


Figura 134. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) para los tres escenarios de clima y demanda por concesiones.
Fuente: Elaboración propia.

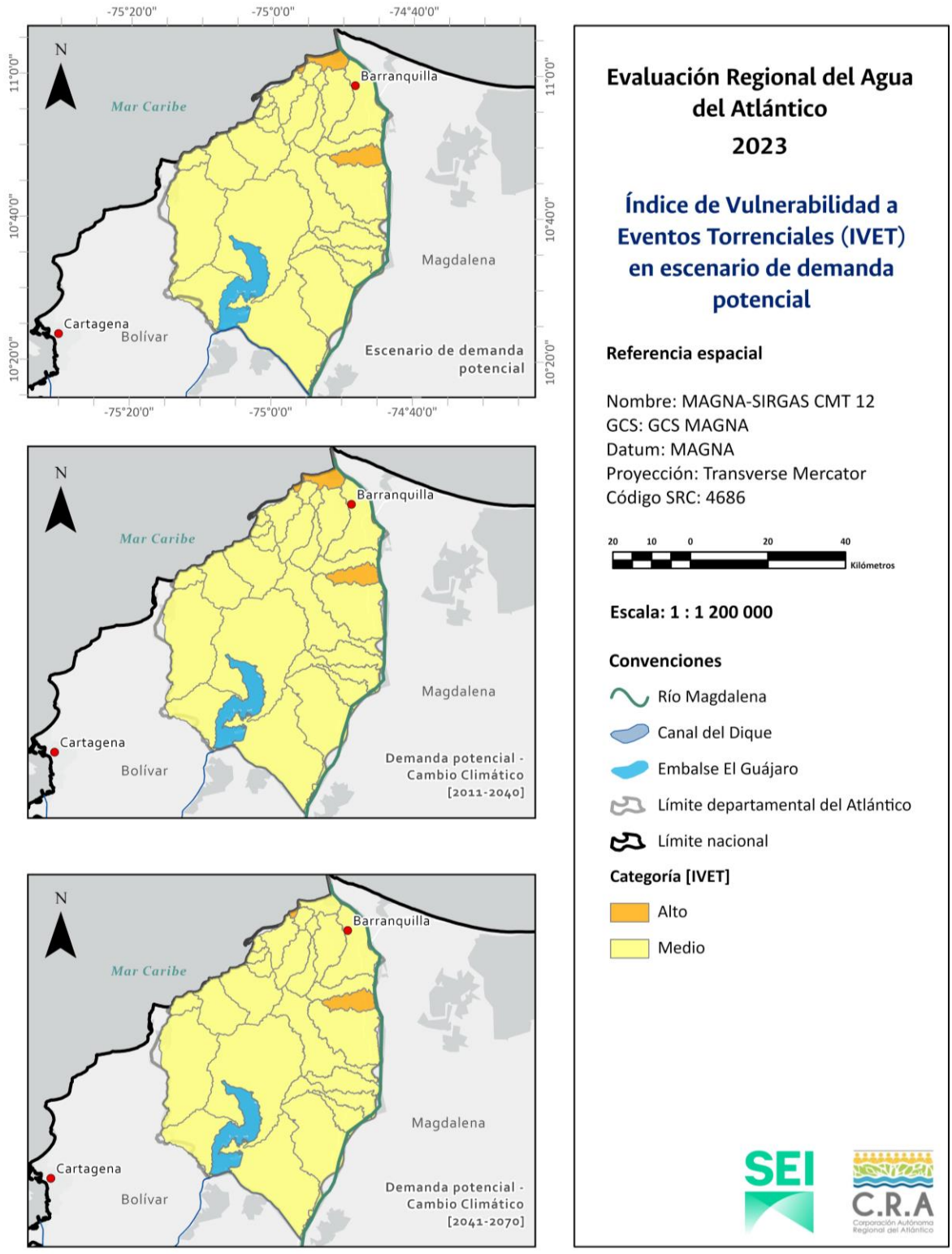


Figura 135. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) para los tres escenarios de clima y escenario de demanda potencial.
Fuente: Elaboración propia.

9.11. Síntesis de escenarios

Esta sección se enfoca fundamentalmente en dar un contexto general de la ERA para el Departamento del Atlántico en base a los indicadores calculados en los diferentes escenarios modelados, identificando aquellas subcuencas que requieren prioridad en la ejecución de acciones que mejoren la gestión del recurso hídrico. Es importante que se haga una planeación adecuada, priorizando las subcuencas que se destacan en esta sección, considerando que el escenario climático corresponde a un escenario pesimista con una menor precipitación y mayor temperatura (resultando en un aumento en la evapotranspiración potencial), respecto a los últimos 30 años, resultando en una afectación a la oferta hídrica disponible. Para realizar este análisis se identificaron como críticas, en cada escenario de modelación propuesto, aquellas subcuencas que cumplieran con las características definidas en la Tabla 55.

Tabla 55. Categorías de análisis de los indicadores de la ERA por escenario y subcuenca.

Indicador de la ERA	**Categoría**
Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)	Bajo y Muy Bajo
Índice de Aridez (IA)	Deficitario y Altamente Deficitario
Índice del Uso del Agua (IUA) años medio y seco[19]	Alto, Muy Alto y Crítico
Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS) años medio y seco[20]	Alto, Muy Alto y Crítico
Índice Integral del Uso de Agua (IIUA) años medio y seco	Alto, Muy Alto y Crítico
Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público respecto al número de habitantes (IASAP)	Cualquier categoría
Índice de Alteración Potencial a la Calidad del Agua (IACAL) años medio y seco	Muy Alto
Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH)[17]	Alto y Muy Alto
Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)	Medio, Alto y Muy Alto

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la función “Análisis de Coordenadas Paralelas” que se encuentra en la pestaña “Estado Dinámica y Tendencias” de la herramienta ERA Tool (ver sección 10.1), se puede identificar fácilmente las subcuencas que cumplen con esta clasificación de categorías para cada escenario mediante un diagrama de ejes paralelos.

9.11.1. Escenario de demanda por concesiones

Para el escenario de demanda por concesiones se observa que la subcuenca CI6 – Plano Costero presenta una condición negativa en todos los indicadores de la ERA (Figura 136), para los tres escenarios de clima (histórico, cambio climático 2011 – 2040 y 2041 – 2070). En los indicadores del sistema hídrico natural esta subcuenca presenta una retención y regulación muy baja y es altamente

[19] Cuando se realice un análisis de presión sobre fuentes subterráneas este indicador podrá clasificarse en cualquier categoría.

[20] Cuando se realice un análisis de presión sobre fuentes superficiales este indicador podrá clasificarse en cualquier categoría.

deficitaria. Para los indicadores de presión presenta una categoría alta en un año medio, pero para un año seco presenta una situación crítica en el IEAS y muy alta en el IIUA, siendo así, una subcuenca que ejerce una presión muy alta sobre la oferta tanto superficial como subterránea. Adicionalmente, es altamente potencial a la contaminación debido a la oferta superficial disponible, al igual que todo el Departamento del Atlántico. Finalmente, en los indicadores de riesgo, su vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico es muy alta y a eventos torrenciales es alta.

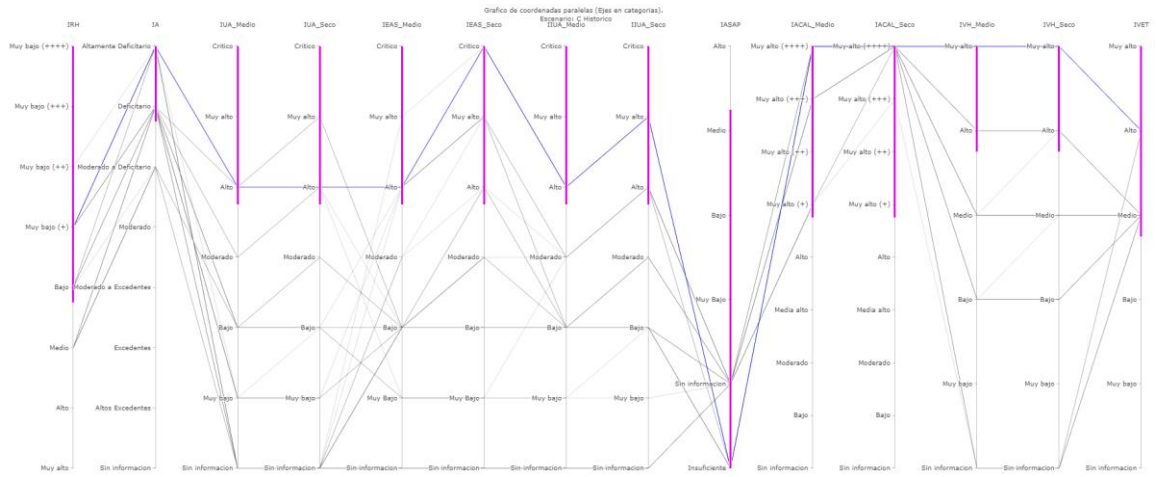


Figura 136. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demandas por concesiones - Análisis general.
Fuente: Elaboración propia.

9.11.1.1. Presión sobre fuentes superficiales en el escenario de demanda por concesiones

Para identificar aquellas subcuencas que presentan una situación negativa relacionada con solo la presión sobre fuentes superficiales, se consideraron que las subcuencas pueden presentar cualquier categoría del IEAS para condiciones de año medio y seco. Para el clima histórico se presenta la misma situación que en el análisis general donde la subcuenca CI6 – Plano Costero es la única que cumple con todas las categorías indicadas en la Tabla 55.

Para los escenarios de cambio climático 2011 – 2040 y 2041 – 2070 las subcuencas CI2 – Oriental Pan de Azúcar y CA3 – Arroyo Caimán presentan un IUA alto y muy alto respectivamente para condiciones de año medio y muy alto y crítico para condiciones de año seco según se muestra en la Figura 137. Es importante priorizar la reglamentación y el uso en fuentes superficiales en estas subcuencas para evitar el agotamiento de las fuentes superficiales disponibles a futuro.

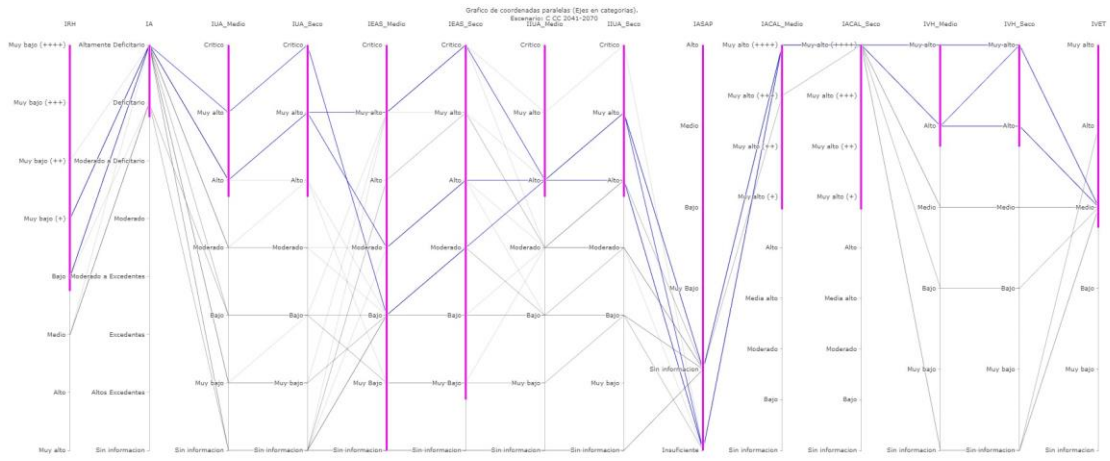


Figura 137. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demandas por concesiones - Análisis sobre fuentes superficiales para escenarios de cambio climático 2011 - 2040 y 2041 – 2070.
Fuente: Elaboración propia.

9.11.1.2. Presión sobre fuentes subterráneas en el escenario de demanda por concesiones

Siguiendo el concepto de la sección anterior, para la identificación de las subcuencas que presentan una situación negativa relacionada con las fuentes subterráneas, se consideró que estas pueden presentar cualquier categoría del IUA y del IVH para condiciones de año medio y seco. Para el periodo de clima histórico y de escenario de cambio climático 2011 – 2040, según la Figura 138 las dos subcuencas en las que se debe priorizar la presión sobre fuentes subterráneas y que presentan condiciones negativas por su condición natural, calidad y riesgo son la CI6 – Plano Costero y MA3 – Ciénaga El Concento. Para el escenario de cambio 2041 – 2070, según la Figura 139 a estas dos subcuencas se les suma la subcuenca CI4 – Cisne.

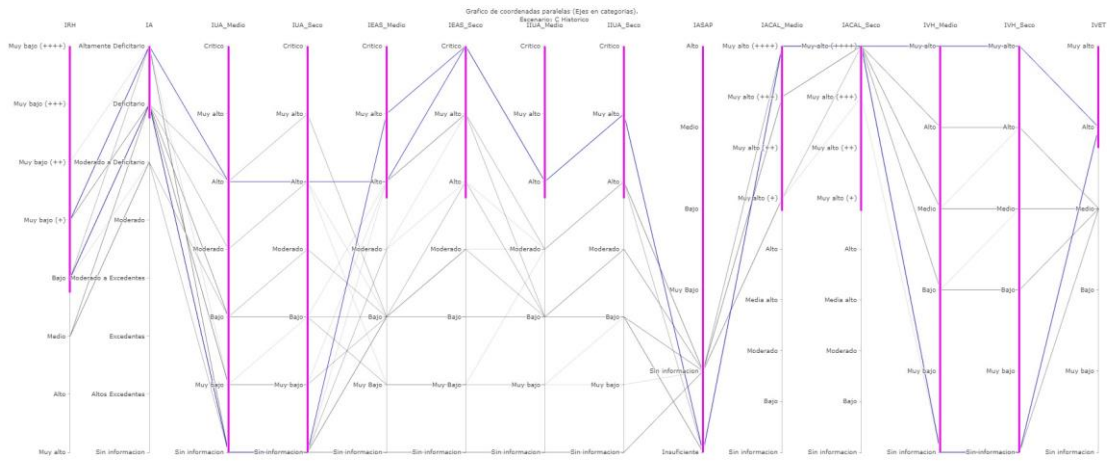


Figura 138. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demandas por concesiones - Análisis sobre fuentes subterráneas para clima histórico y escenario cambio climático 2011-2040.
Fuente: Elaboración propia.

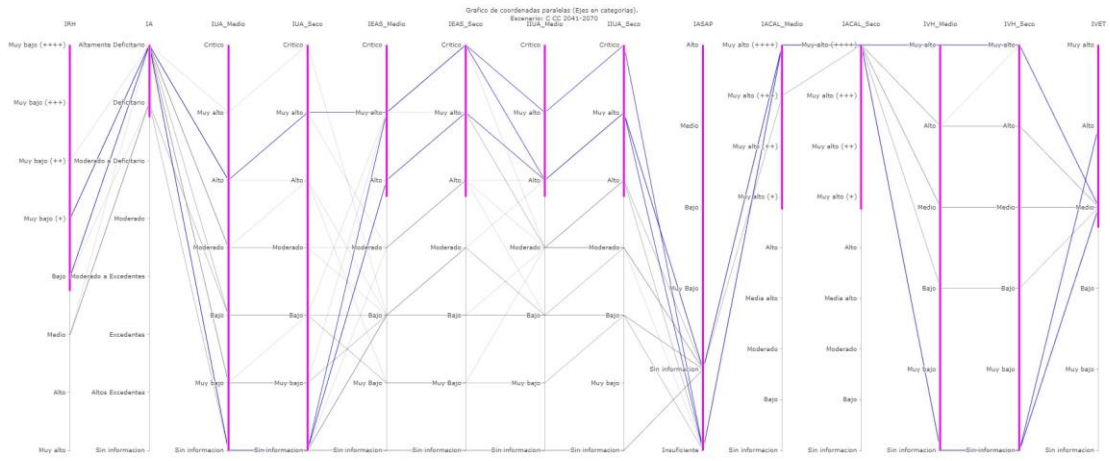


Figura 139. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demandas por concesiones - Análisis sobre fuentes subterráneas para escenario cambio climático 2041-2070.
Fuente: Elaboración propia.

9.11.2. Escenario de demanda potencial

Para el escenario de demanda potencial considerando un clima histórico presentado en la Figura 140 se evidencia que tres subcuencas presentan una situación hídrica desfavorable: CI6 – Plano Costero (al igual que en el escenario de demanda por concesiones), CI2- Oriental Pan de Azúcar en la subzona hidrográfica Mallorquín, y la subcuenca MA2 – Ciénaga de Malambo en Magdalena. Esta última subcuenca en particular presenta una situación crítica respecto a la presión sobre fuentes superficiales y subterráneas en condiciones de año y medio seco.

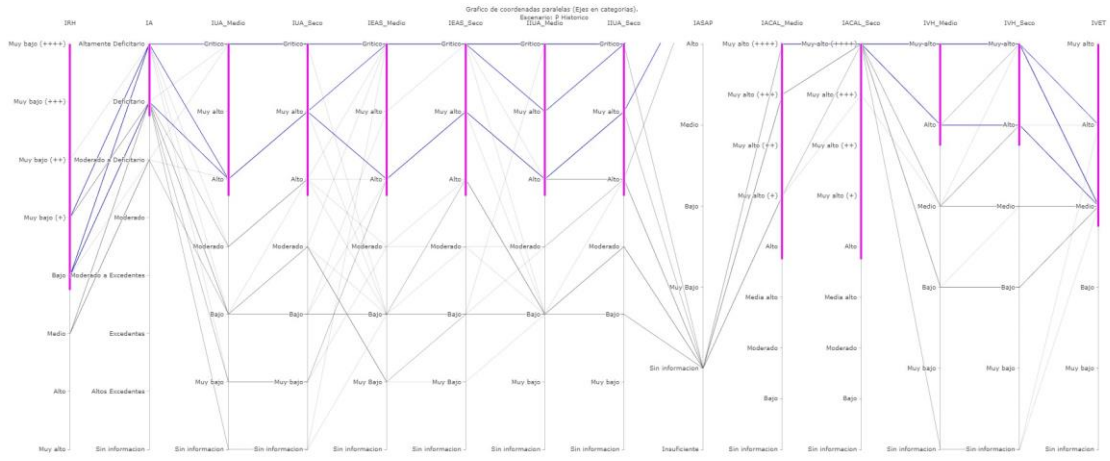


Figura 140. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis general, clima histórico.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 141 se identifica que, para los escenarios de cambio climático 2011 – 2040 y 2041 – 2070, adicional a las tres subcuencas con situación desfavorable en el escenario de clima histórico, se suma la subcuenca CI4 – Cisne. Esta subcuenca presenta una situación crítica en el IEAS para condiciones de año seco, y una presión alta para año medio. Adicionalmente, tiene una alta presión sobre fuentes superficiales, y una muy alta vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico.

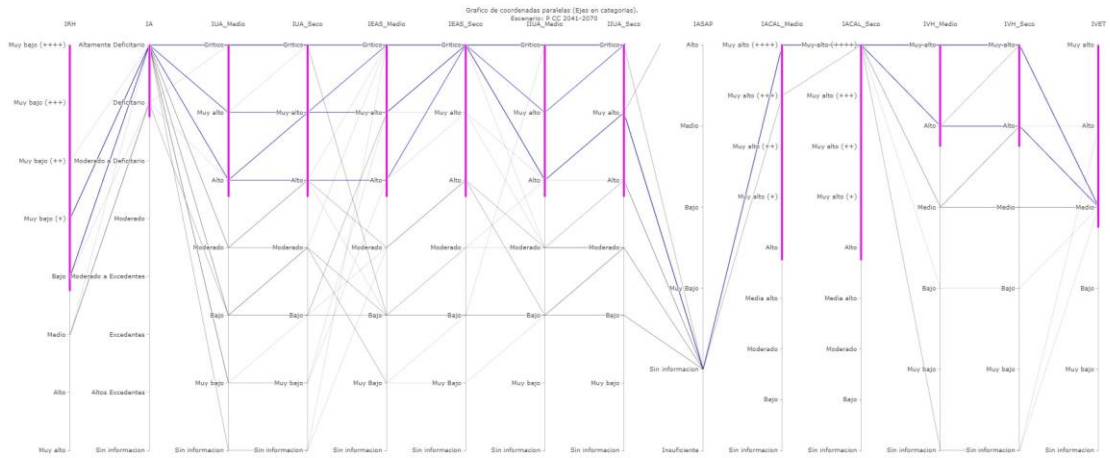


Figura 141. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis general, escenarios de cambio climático 2011 - 2040 y 2041 – 2070.
Fuente: Elaboración propia.

9.11.2.1. Presión sobre fuentes superficiales en el escenario de demanda potencial

Mediante el mismo análisis que se generó sobre fuentes superficiales en el escenario de demandas por concesiones, para el escenario de demanda potencial sobre fuentes superficiales no se evidencian cambios respecto a la situación general donde las subcuencas CI6 – Plano Costero, CI2- Oriental Pan de Azúcar en la subzona Caribe y MA2 – Ciénaga de Malambo en Magdalena. Esto indica que potencialmente no se espera que otras subcuencas ejerzan una presión alta o muy alta sobre fuentes superficiales considerando el clima histórico.

Para los escenarios de cambio climático 2011 – 2041 y 2041 – 2070, adicional a las tres subcuencas anteriores, las subcuencas CI4 – Cisne, CA3 – Arroyo Caimán y DI1 – Occidental Embalse del Guájaro son potencialmente susceptibles a la presión superficial que se puede ejercer sobre ellas (Figura 142). Esto relacionado directamente con el agua superficial que debería extraerse para satisfacer las necesidades relacionadas con el crecimiento de la población y las actividades de tipo agrícola y pecuario según el uso de la tierra.

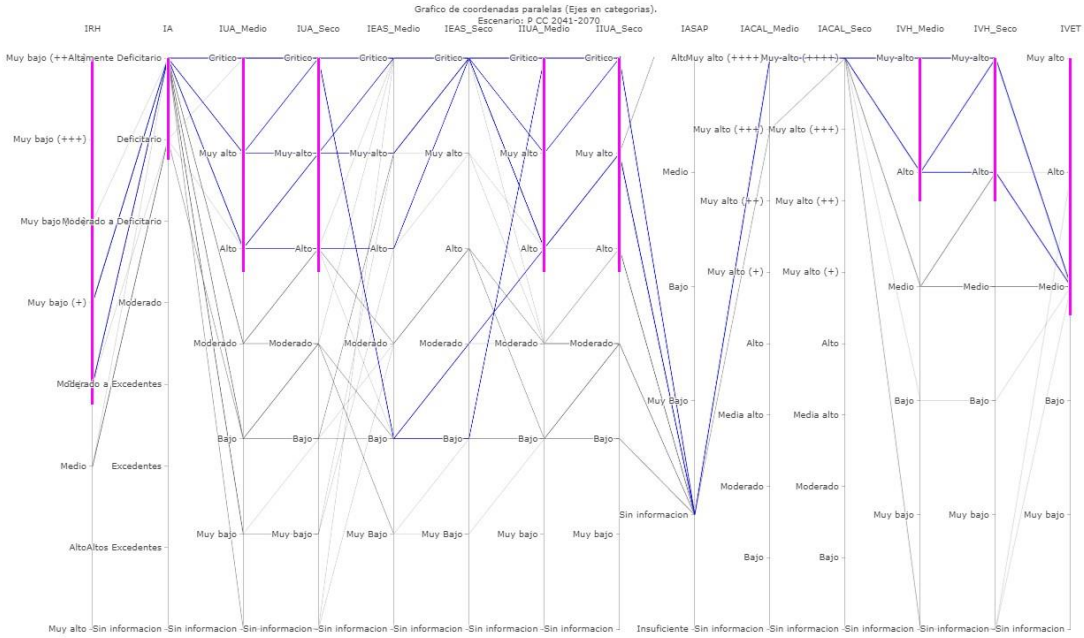


Figura 142. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis sobre fuentes superficiales para escenarios de cambio climático 2011 - 2040 y 2041 – 2070.
Fuente: Elaboración propia.

9.11.2.2. Presión sobre fuentes subterráneas en el escenario de demanda potencial

De acuerdo con el diagrama de ejes paralelos que se presenta en la Figura 143, para el escenario de clima histórico y de cambio climático 2011 – 2040, existen 7 subcuencas que ejercen una presión alta o muy alta sobre fuentes subterráneas y adicionalmente tienen condiciones desfavorables en cuanto a su condición natural, calidad y riesgo. Dentro de las 7 subcuencas, 3 se encuentran en la subzona hidrográfica de Mallorquín (CI2 – Oriental Pan de Azúcar, CI4 – Cisne y CI6 – Plano Costero), y las 4 subcuencas restantes en Magdalena (MA1 – Urbano y Ciénaga La Bahía, MA2 – Ciénaga de Malambo, MA3 – Ciénaga El Convento y MA4-7 – Ciénagas Sabanagrande, Santo Tomás, Luisa, Mantí y Paraíso). Para el escenario de cambio climático 2041 – 2070, según la Figura 144, a las 7 subcuencas anteriores se suman la subcuenca MA8 – Arroyo Grande en Magdalena y DI3 – Norte Canal del Dique donde la oferta subterránea disponible se disminuirá considerablemente.

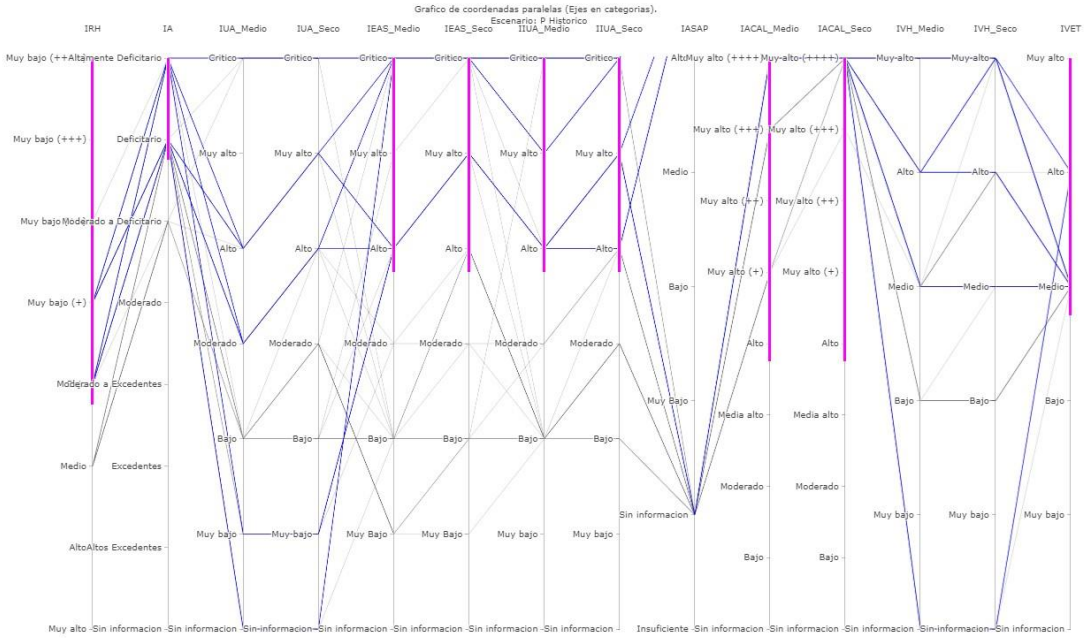


Figura 143. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis sobre fuentes subterráneas para clima histórico y escenario cambio climático 2011-2040.
Fuente: Elaboración propia.

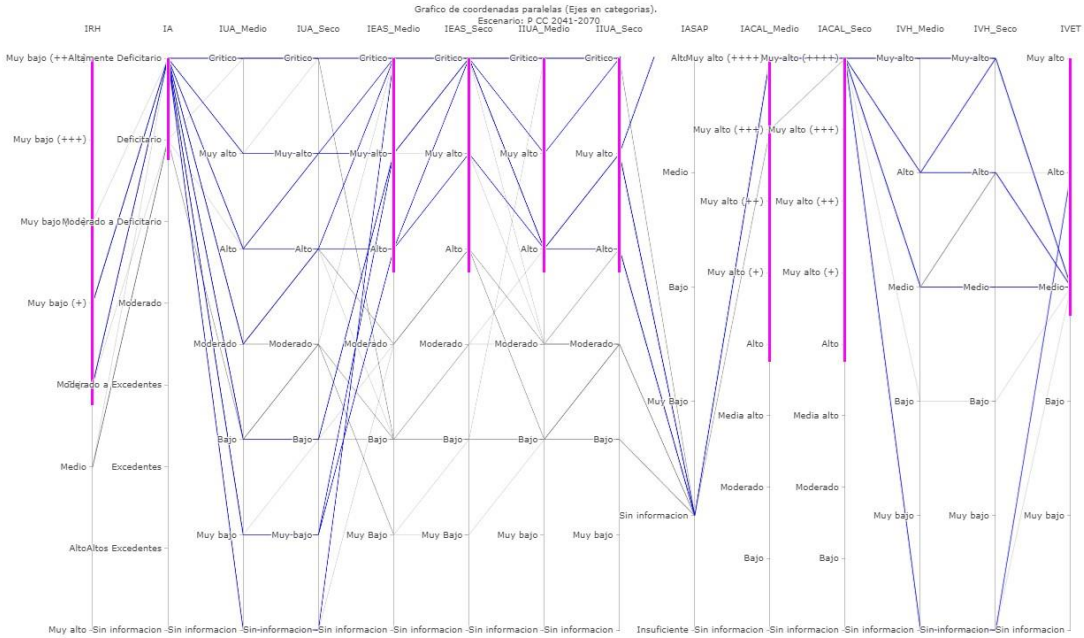


Figura 144. Diagrama de ejes paralelos - Escenario de demanda potencial - Análisis sobre fuentes subterráneas para escenario cambio climático 2041-2070.
Fuente: Elaboración propia.

10. Herramientas de aprendizaje y capacitaciones

Con el objetivo de presentar los resultados de la ERA del Departamento del Atlántico mediante herramientas de visualización e interacción amigables con cualquier usuario y que, adicionalmente, permitan contar con información base para la toma de decisiones robusta se han desarrollado dos herramientas: ERA TOOL R y ERA CRA ArcGIS Experience. La ERA TOOL R es una herramienta técnica que le permite a los tomadores de decisiones analizar los indicadores de la ERA en las diferentes subcuencas mediante mapas y gráficos, como el diagrama de ejes paralelos, para una generar una decisión más informada. ERA CRA ArcGIS Experience es una herramienta visual y estéticamente más agradable y amigable, que puede mostrarse y presentarse en presentaciones relacionadas con cualquier tipo de público al mostrar el resultado de los indicadores de manera espacial mediante mapas interactivos. Ambas herramientas fueron presentadas con los integrantes de la CRA y se les realizo una capacitación en su uso.

10.1. Herramienta ERA TOOL R

Esta herramienta fue desarrollada en el lenguaje de programación R y está basada en la interfaz del paquete Shiny[21] que permite crear un entorno interactivo y ser publicado en la web con ciertas limitaciones de uso. El enfoque principal de la ERA TOOL R es mostrar los indicadores de la ERA, obtenidos a partir del modelo WEAP, mediante herramientas de visualización amigables que permiten contar con información base para la toma de decisiones robusta, pero que también pueda ser de libre acceso para cualquier usuario. La herramienta se puede consultar en el enlace: https://latinoamericasei.shinyapps.io/ERA_CRA/.

Las pestañas con las que cuenta ERA TOOL R son:

- **Inicio:** Descripción de la plataforma y sus funcionalidades, así como información base utilizada en el desarrollo del modelo WEAP.
- **Contexto:** Información base del Departamento del Atlántico como localización de municipios, tipo de cobertura y suelos, delimitación hidrográfica, acuíferos, etc, mostrada mediante mapas.
- **Descripción Indicadores ERA:** Explicación de los indicadores incluidos en la plataforma.
- **Exploración por Indicador:** Resultados de la ERA por indicador.
- **Indicador IVICAS:** Resultado de la evaluación del IVICAS.
- **Calidad de Agua:** Resultados del ICA e IMA según los monitoreos realizados.
- **Estado, Dinámica y Tendencias:** Muestra los resultados de manera simultánea para todos los indicadores por subcuenca en forma de mapa, tabla, diagrama de ejes paralelos, gráficos de caja y mapas de calor que permiten comparar los indicadores calculados para diferentes escenarios.
- **Curva de Duración de Caudales:** Presenta la gráfica correspondiente a la curva de duración de caudales de cada subcuenca y un mapa observando los porcentajes de excedencia.
- **Estimación de caudales:** Permite la estimación de caudales medios mensuales multianuales para una unidad hidrológica.

[21] https://shiny.posit.co/.

Se le entregó a la CRA una carpeta que contiene la herramienta ERA TOOL R junto con un manual donde se detalla paso a paso el proceso de actualización desde los cambios que se realicen en el modelo WEAP hasta la publicación en la web.

10.2. Plataforma Interactiva ERA CRA ArcGIS Experience

ArcGIS Experience es una herramienta dentro del ecosistema de ArcGIS Pro que permite crear experiencias interactivas y personalizadas para presentar y compartir datos geoespaciales. Estas experiencias pueden incluir mapas, imágenes, gráficos, videos y otros elementos multimedia para contar historias de manera visual y atractiva. Para mostrar el resultado de los indicadores de la Evaluación Regional del Agua en el Atlántico se creó la herramienta ERA CRA ArcGIS Experience la cual se puede consultar en el siguiente enlace: Exploración | ERA Tool CRA (arcgis.com). Esta herramienta cuenta con cuatro pestañas:

- **Inicio:** Descripción general del convenio e información base utilizada en el desarrollo del modelo ERA-CRA en WEAP.
- **Contexto:** Información base del Departamento del Atlántico como localización de municipios, tipo de cobertura y suelos, delimitación hidrográfica, acuíferos, etc., mostrada mediante mapas interactivos, a diferencia de la ERA R TOOL.
- **Introducción a indicadores de la ERA:** Explicación general de los indicadores ERA.
- **Exploración por indicador:** Permite explorar los resultados de cada indicador de la ERA y hacer comparaciones entre escenarios mediante una ventana movible.

Se le entregó a la CRA una carpeta que contiene la herramienta ERA CRA ArcGIS Experience junto con un manual donde se detalla paso a paso el proceso de actualización desde los cambios que se realicen en el modelo WEAP hasta la publicación en la web. Esta actualización está sujeta a que la CRA cuente con la licencia de ArcGIS Pro.

10.3. Capacitaciones y Talleres

Como objetivo de este convenio se estableció realizar 2 capacitaciones y 3 talleres con los funcionarios de la CRA. Las capacitaciones se relacionaron con el manejo de WEAP y las herramientas ERA TOOL R y ERA CRA ArcGIS Experience, mientras que los talleres se enfocaron en la validación de las fuentes de información, el modelo WEAP ERA-CRA y los resultados obtenidos en los indicadores ERA. Adicional a estas actividades, en las etapas preliminares del convenio se realizó un taller para presentar la información disponible y recibida para el desarrollo de la ERA. A continuación, se describe con mayor detalle cada una de las capacitaciones y talleres realizados durante este convenio. Para validar que las capacitaciones y asistencias talleres tuvieran un resultado positivo en cuanto a la forma de enseñar, al conocimiento adquirido y a la validación de resultados, se realizaron encuestas al final de cada sesión a cada funcionario de la CRA que estuvo presente en la sesión, a excepción del taller 1 de validación de fuentes de información. El resultado de estas encuestas de las capacitaciones y asistencias técnicas se presenta en el anexo 13.4. Adicionalmente se entrega una carpeta con las presentaciones, archivos aplicados en los ejercicios, fotografías y videos de cada capacitación y asistencia técnica.

10.3.1. Taller a: Inventario y consolidación de información disponible

El taller a se realizó el día 27 de julio de 2023 donde se realizó un inventario de la información disponible a la fecha, la información faltante y compromisos de entrega. El resultado de este taller y las fuentes de información se presentaron en la sección 2 y la Tabla 1.

10.3.2. Capacitación 1: Uso de WEAP

La capacitación 1 se realizó el día 1 de noviembre de 2023 y tuvo como objetivo mostrar a los funcionarios de la CRA las generalidades del modelo para la gestión de recursos hídricos WEAP. Inicialmente se realizó la instalación del software y se explicó a los funcionarios como obtener y renovar la licencia. Posteriormente se explicó las generalidades de WEAP, su modelo hidrológico, la utilidad en procesos de toma de decisiones relacionados con la gestión del recurso hídrico y su aplicación para el cálculo de indicadores ERA. Luego, se trabajó el tutorial de WEAP en una hora de manera práctica. En esta actividad se exploró la interfaz gráfica del software, se creó un área de estudio, se definieron parámetros generales como año y escala temporal de modelación, se ingresaron elementos y se visualizaron resultados. Este tutorial se puede descargar en el siguiente enlace https://www.weap21.org/downloads/WEAP_Tutorial_Spanish.pdf. Finalmente, se realizó un ejercicio enfocado en el Departamento del Atlántico donde se exploraron los diferentes elementos de WEAP y sus funcionalidades como el elemento río, unidad hidrológica, sitio de demanda, agua subterránea, embalse y se cambiaron diferentes parámetros para explorar en los resultados diferentes escenarios de simulación. La evaluación de la capacitación 1 se presenta en el anexo 13.4.1.

10.3.3. Taller b: Validación de datos de entrada al modelo WEAP

El taller b se realizó el día 2 de noviembre de 2023 y tuvo como objetivo validar las fuentes de información y datos de entrada al modelo WEAP. Esta asistencia técnica se realizó el día después de la capacitación 1 con el propósito de que los funcionarios entendieran de manera clara los elementos ingresados en el modelo WEAP y vistos en la primera capacitación. La asistencia técnica se dividió en dos partes. La primera consistió en validar la representación de elementos como la delimitación y caracterización de subcuencas, acuíferos, clima, estimación de parámetros de calibración, el embalse el Guájaro y las demandas dentro del modelo los cuales se explicaron a lo largo de este informe. La segunda parte consistió en validar los escenarios de modelación propuestos en la sección 6. La validación de parámetros de entrada al modelo y escenarios de modelación fue aceptada y validada por la corporación mediante una encuesta la cual se presenta en el anexo 13.4.2.

10.3.4. Capacitación 2: Herramientas ERA TOOL R y ArcGIS Experience

La capacitación 2 se realizó el día 27 de noviembre de 2023 y tuvo como objetivo mostrar las herramientas que muestran de manera más didáctica, amigable e interactiva los resultados de la ERA en el Departamento del Atlántico y cómo se pueden actualizar mediante un ejercicio práctico. En

ambas herramientas se exploró la interfaz gráfica, su contenido, y cómo estas herramientas pueden ser de gran utilidad para la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico dentro de la CRA. Cada herramienta se entregó mediante una carpeta con los archivos requeridos para su funcionamiento y un manual para su correcto visualización y actualización. La evaluación de la capacitación en las herramientas, sus funcionalidades y utilidad se presentan en el anexo 13.4.3.

10.3.5. Taller c: Validación indicadores ERA en el Atlántico

El taller c se realizó el día 28 de noviembre de 2023 y se enfocó en la validación del resultado de los indicadores ERA en el Departamento del Atlántico para los diferentes escenarios de modelación. La visualización de resultados se realizó mediante la herramienta ERA TOOL R para que los funcionarios pudieran familiarizarse con el uso de la herramienta, su interfaz gráfica y los diferentes mapas y gráficos que permitan una toma de decisiones informada. Los resultados fueron validados mediante una encuesta donde en cada indicador se preguntó a los funcionarios si estaban de acuerdo o no con el indicador y en que subcuencas debían realizarse cambios. Los resultados de esta encuesta se presentan en el anexo 13.4.4.

11. Conclusiones y recomendaciones

En el presente informe se presenta el desarrollo y resultados de la Evaluación Regional del Agua (ERA) del Departamento del Atlántico, desarrollada para la Corporación Autónoma Regional del Atlántico. Durante el desarrollo de la ERA se recopiló y proceso información que para caracterizar el Departamento del Atlántico en términos de información atingente a recursos hídricos.

La información recopilada y analizada durante el desarrollo de la ERA incluyó la dimensión física (sección 3.1), infraestructura relevante (sección 3.2), clima (sección 3.3), calidad de agua (sección 4) y usos del agua (sección 5) en el Departamento del Atlántico. La caracterización climática consideró una contextualización histórica en base a observaciones y potenciales condiciones futuras en base a los resultados del IPCC. Se definió un escenario pesimista en términos de aumento en temperaturas y disminución en precipitaciones. La caracterización de usos de agua consideró una contextualización histórica de las concesiones existentes, subclasificando los tipos de usos y las fuentes de abastecimiento, y un análisis de demandas potenciales en base a las coberturas de la tierra y número de habitantes.

En base a esta información se construyó un modelo de recursos hídricos en la plataforma WEAP (sección 7), el modelo ERA-CRA, el cual fue evaluado en una combinación de 3 escenarios de clima, representativos de los períodos 1993 – 2022, 2011 – 2040 y 2041 – 2070, y 3 escenarios de usos de agua, representativos de condiciones sin demandas, condiciones en base a concesiones y condiciones potenciales del uso del agua (sección 6). A partir del modelo ERA-CRA y los escenarios definidos para la ERA, se evaluaron los indicadores de la ERA tanto en el período histórico como en potenciales escenarios futuros (secciones 8 y 9).

El desarrollo de esta ERA consideró diversas actividades entre talleres y capacitaciones a la CRA (sección 10.3). Adicionalmente, se desarrolló una plataforma en R y en ArcGIS Experience para la visualización de los indicadores resultantes del modelo ERA-CRA (secciones 10.1 y 10.2, respectivamente), además de la correspondiente capacitación para actualizar estas plataformas en base a potenciales nuevos resultados de los indicadores.

Los resultados de los indicadores de la ERA para el escenario de demandas por concesiones, independientemente del período de evaluación, muestran que la subcuenca CI6 – Plano Costero, ubicada en la subzona Mallorquín, es la que presenta una situación más crítica dentro del Departamento del Atlántico. Esto, debido a su baja retención y regulación del agua, además de una alta presión sobre el agua tanto superficial como subterráneo. En cuanto al uso de agua subterránea para el abastecimiento público, su distribución es insuficiente. Adicionalmente, esta subcuenca es altamente potencial a la contaminación de cuerpos de agua y, en términos de riesgo, es vulnerable al desabastecimiento hídrico y a eventos torrenciales. Para el caso del escenario de demandas potenciales en el período histórico (1993 – 2022) las subcuencas más críticas corresponden a CI6 – Plano Costero y CI2- Oriental Pan de Azúcar de la subzona Mallorquín y MA2 – Ciénaga de Malambo de la subzona Magdalena, además de la subcuenca CI4 – Cisne de la subzona Mallorquín en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070.

Considerando únicamente aspectos de agua superficial, para el escenario de demandas por concesiones, la subcuenca CI6 – Plano Costero es la única en condición crítica en el período histórico; sin embargo, en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, las subcuencas CI2 – Oriental Pan de Azúcar y CA3 – Arroyo Caimán son consideradas también dentro de esta categoría. Para el escenario de demandas potenciales, las subcuencas CI6 – Plano Costero, CI2- Oriental Pan de Azúcar en la subzona Caribe y MA2 – Ciénaga de Malambo en Magdalena son las únicas consideradas críticas en el período histórico. Es importante notar que estas últimas 3 subcuencas son críticas también al considerar aspectos tanto de aguas subterráneas como superficiales. Sin embargo, en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070, las subcuencas CI4 – Cisne, CA3 – Arroyo Caimán y DI1 – Occidental Embalse del Guájaro son consideradas también dentro de esta categoría.

Considerando únicamente aspectos de agua subterránea, en una condición histórica (1993 – 2022) y en el período 2011 – 2040, además de la subcuenca CI6 – Plano Costero, la subcuenca MA3 – Ciénaga El Concento también es considerada crítica. Para el período 2041 – 2070, la subcuenca CI4 – Cisne también entra en la categoría de críticas. Para el escenario de demandas potenciales, en una condición histórica (1993 – 2022) y en el período 2011 – 2040, existen 7 subcuencas críticas. En la subzona de Mallorquín se encuentran las subcuencas CI2 – Oriental Pan de Azúcar, CI4 – Cisne y CI6 – Plano Costero y en la subzona Magdalena se encuentran las subcuencas MA1 – Urbano y Ciénaga La Bahía, MA2 – Ciénaga de Malambo, MA3 – Ciénaga El Convento y MA4-7 – Ciénagas Sabanagrande, Santo Tomás, Luisa, Mantí y Paraíso. Para el período 2041 – 2070, se suman la subcuenca MA8 – Arroyo Grande y DI3 – Norte Canal del Dique.

Es importante considerar que un escenario cambiante donde se espera un aumento de temperaturas en un corto plazo, una disminución en precipitación resultaría en una condición más crítica, lo que ocurre en el escenario climático analizado en los períodos 2011 – 2040 y 2041 – 2070. De la misma forma, en escenarios potenciales de demanda, donde esta representa la mayor demanda posible asociada a coberturas y usos de la tierra, además de demanda de la población, generarán también que la condición en las subcuencas sea más crítica.

Los resultados de los indicadores permitirán priorizar acciones en base a las urgencias y objetivos locales en el Departamento del Atlántico. En este estudio se definieron umbrales para cada uno de los indicadores de la ERA, dando a lugar a una priorización inicial de subcuencas. Dentro de las acciones futuras a considerar por la CRA es la elaboración de una reglamentación que favorezca el abastecimiento de agua a los distintos usos, distribuyendo sustentablemente, tanto económica como ambientalmente, las extracciones en las distintas fuentes a lo largo del Departamento. Se sugiere que esta reglamentación considere el apoyo del modelo ERA-CRA, desarrollado en este estudio, para cuantificar las potenciales incertidumbres y explorar distintas condiciones que permitan lograr los

objetivos de la manera más sostenible posible. Adicionalmente, como se indica en la sección 7.7, el modelo ERA-CRA debe estar en constante actualización para disminuir las incertidumbres asociadas a la herramienta y avanzar en la representatividad de esta.

12. Bibliografía

Aedo, S., Vicuña, S., Poblete, D., Leray, S., Figueroa, F., Quiróz, R. (2023). Modeling Seawater Intrusion in an Integrated Water Resources Model of a Semi-Arid Coastal Basin in Drought and Increasing Water Demand Conditions. American Geophysical Union fall meeting, 2023.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 56. 26-40.

Campbell, G.S, Norman, J.N. (1998). An Introduction to Environmental Biophysics. Segunda edición. Springer.

Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., and Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. Hydrological Sciences Journal, https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450.

Convenio CNV 2014020, Corpoboyacá-Universidad Pontificia Bolivariana (2014). Determinación de módulos de consumo de agua para los sectores industrial, pecuario, agrícola, energético y de servicios en jurisdicción.

Corporación Autónoma Regional del Atlántico – CRA (2012). Actualización del manual de operaciones del hidrosistema al cual pertenece el embalse El Guájaro y llevar a cabo el diseño de las estructuras y sistemas para disminuir la vulnerabilidad de la zona ante eventos climatológicos extremos. Elaborado por: Universidad del Magdalena a través del Grupo de Investigación Integrado de Ingeniería Civil.

Corporación Autónoma Regional del Atlántico – CRA (2013). Estructuración y espacialización de los Índices de Uso del Agua – IUA en la jurisdicción de Corporación Autónoma Regional del Atlántico. Elaborado por: Luis Fernando Castro Hernández.

Corporación Autónoma Regional del Atlántico – CRA (2015). Diagnóstico preliminar de los acuíferos del Departamento del Atlántico en el marco de la elaboración de los planes de manejo de acuíferos. Elaborado por: Servicios Hidrogeológicos Integrales S.A.S.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Disponible en: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion.

Estupiñán, M.C., Monroy, J.J., Ruíz, E., Mosquera, M (2021). Nota técnica: Costos de operación de tres sistemas de riego en el Campo Experimental Palmar de la Sierra. Fedepalma/Cenipalma.

Gleick, P. H. 1996. "Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs." Water International. 21:83–92.

Gómez-Latorre, D.A., Rozo, Y., Rochel, E., Tofiño, A. (2023). Estimación del efecto de la sequía sobre la productividad del frijol variedad AGROSAVIA rojo 43 en el Caribe Colombiano. Avances en Investigación Agropecuaria. Corporación de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA. https://doi.org/10.53897/RevAIA.23.27.03.

Instituto Colombiano Agropecuario – ICA. Censos Pecuarios Nacional. Disponible en: https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2013). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2017). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (2007). Estudio general de suelos y Zonificación de Tierras, Departamento del Atlántico.

Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras – INGEOMINAS (1985). Hidrogeología de los Departamentos del Atlántico y Bolívar al norte del canal del Dique.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Económico - MINAMBIENTE (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000: Titulo B, Sistemas de acueducto. Bogotá D.C.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarollo Territorial – MAVDT (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrinseca de los acuíferos a la contaminación.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel R. D. and Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol. 50(3): 885-900. https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf.

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, Geosci. Model Dev., 9, 3461–3482, https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016.

O'Sullivan, J. (2018). Synergy between population policy, climate adaptation and mitigation. In M. Hossain et al. (Eds.), Pathways to a sustainable economy (pp. 103–127). Springer.

Servicio Evaluación Ambiental de Chile – SEA Chile (2023). Consultoría para la Incorporación del Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico. Servicio de Evaluación Ambiental, División de Evaluación Ambiental y Participación Ciudadana, Santiago, Chile. Elaborado por: Hídrica Consultores SpA.

Yates, D., J. Sieber, and D. Purkey (2005a). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1, Water Int., 30(4), 487–500.

Yates, D., D. Purkey., J. Sieber, A. Huber-Lee., and Galbraith, H. (2005b). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 2, Water Int., 30(4), 501–512.

13. Anexos

13.1. Coberturas y uso de la tierra, suelos y pendientes a escala de subzonas hidrográficas

En las secciones 3.1.3 y 3.1.4 se presentó la caracterización de coberturas y usos de la tierra y la caracterización de suelos y pendientes para el Departamento del Atlántico. En este anexo se presenta esta información desagregada para cada una de las subzonas hidrográficas del Departamento. La Tabla 56, Tabla 57, Tabla 58 presentan la desagregación por subzona hidrográfica de las coberturas y usos de la tierra, suelos y pendientes, respectivamente.

Tabla 56. Categorías de coberturas y usos de la tierra del Departamento del Atlántico desagregado por subzona hidrográfica.

Subzona hidrográfica	Categoría	Área [km^2]	Porcentaje de la subzona
Arroyos Directos al Caribe	Agrícola	26.6	3.4
	Área Abierta	11.4	1.5
	Bosque	331.2	42.6
	Cultivos Permanentes	0.1	0.0
	Cultivos Transitorios	0.1	0.0
	Minería	3.6	0.5
	Pasto	336.8	43.3
	Superficie de Agua	32.4	4.2
	Urbano	20.3	2.6
	No Definido	15.5	2.0
Canal del Dique margen derecho	Agrícola	122.4	10.9
	Área Abierta	17.7	1.6
	Bosque	259.6	23.2
	Cultivos Permanentes	5.0	0.4
	Cultivos Transitorios	2.0	0.2
	Minería	4.2	0.4
	Pasto	530.9	47.4
	Superficie de Agua	154.5	13.8
	Urbano	20.1	1.8
	No Definido	3.8	0.3
Ciénaga Mallorquín	Agrícola	4.8	1.8
	Área Abierta	4.4	1.6
	Bosque	73.3	27.1
	Cultivos Permanentes	0.1	0.0
	Cultivos Transitorios	0.1	0.0
	Minería	6.2	2.3
	Pasto	120.1	44.5
	Superficie de Agua	14.8	5.5
	Urbano	45.4	16.8
	No Definido	0.8	0.3
Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe	Agrícola	106.3	9.4
	Área Abierta	30.2	2.7
	Bosque	157.1	13.8
	Cultivos Permanentes	4.4	0.4
	Cultivos Transitorios	5.9	0.5

Subzona hidrográfica	Categoría	Área [km²]	Porcentaje de la subzona
	Minería	2.2	0.2
	Pasto	631.7	55.7
	Superficie de Agua	69.0	6.1
	Urbano	127.1	11.2
	No Definido	1.1	0.1

Fuente: Elaboración propia a partir de información provista por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico y adaptación de Corine Land Cover del 2018 (disponible en https://www.colombiaenmapas.gov.co/).

Tabla 57. Presencia de las clasificaciones de suelo del Departamento del Atlántico, desagregado por subzona hidrográfica.

Subzona hidrográfica	Categoría suelo	Área [km²]	Porcentaje de la subzona
Arroyos Directos al Caribe	Fino	291.4	37.5
	Moderado	387.4	49.8
	Grueso	70.6	9.1
	Zona Urbana	8.6	1.1
	Cuerpo de Agua	19.7	2.5
	No Definido	0.2	0.0
Canal del Dique margen derecho	Fino	269.3	24.0
	Moderado	527.1	47.1
	Grueso	191.3	17.1
	Zona Urbana	12.2	1.1
	Cuerpo de Agua	120.3	10.7
	No Definido	0.1	0.0
Ciénaga Mallorquín	Fino	92.5	34.2
	Moderado	109.4	40.5
	Grueso	28.6	10.6
	Zona Urbana	30.9	11.4
	Cuerpo de Agua	8.8	3.3
	No Definido	0.0	0.0
Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe (mi)	Fino	359.1	31.6
	Moderado	413.9	36.5
	Grueso	208.4	18.4
	Zona Urbana	120.9	10.7
	Cuerpo de Agua	32.7	2.9
	No Definido	0.1	0.0

Fuente: Elaboración propia a partir de información compartida por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

Tabla 58. Presencia de las clasificaciones de las pendientes del suelo del Departamento del Atlántico, desagregado por subzona hidrográfica.

Subzona hidrográfica	Categoría pendiente	Área [km²]	Porcentaje de la subzona
Arroyos Directos al Caribe	Planicie Suave	222.7	28.6
	Moderado	112.5	14.5
	Empinado	199.5	25.6
	Fuerte	214.9	27.6
	No Definido	28.5	3.7
Canal del Dique margen derecho	Planicie Suave	393.8	35.1
	Moderado	309.1	27.6
	Empinado	213.9	19.1
	Fuerte	71.0	6.3
	No Definido	132.5	11.8

Subzona hidrográfica	Categoría pendiente	Área [km^2]	Porcentaje de la subzona
Ciénaga Mallorquín	Planicie Suave	63.4	23.5
	Moderado	120.4	44.6
	Empinado	39.6	14.7
	Fuerte	7.0	2.6
	No Definido	39.7	14.7
Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe (mi)	Planicie Suave	489.3	43.1
	Moderado	482.4	42.5
	Empinado	8.1	0.7
	Fuerte	1.5	0.1
	No Definido	153.7	13.5

Fuente: Elaboración propia a partir de información compartida por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

13.2. Parámetros calibrados del modelo ERA-CRA

En la sección 7.4 se presentó la estrategia de calibración de los parámetros del método de humedad de suelo del modelo ERA-CRA. Los parámetros del método de humedad de suelo se calculan a partir de la combinación de factores que influyen en estos. Estas combinaciones se presentan en la Tabla 25. Los parámetros resultantes del proceso de calibración se presentan en la Tabla 59.

Tabla 59. Parámetros resultantes del proceso de calibración del modelo ERA-CRA.

Parámetro	Categoría (Cobertura y uso de la tierra/Suelo/Pendiente)	Valor
K_c	Agricola	1.21
	Area_Abierta	0.70
	Bosque	1.00
	Cultivos_Permanentes	1.19
	Cultivos_Transitorios	1.23
	Mineria	0.50
	Pasto	0.90
	Cuerpo_Agua	1.20
	Urbano	0.32
RRF	Agricola	2.46
	Area_Abierta	1.63
	Bosque	3.42
	Cultivos_Permanentes	1.67
	Cultivos_Transitorios	1.66
	Mineria	1.50
	Pasto	1.66
	Cuerpo_Agua	20.03
	Urbano	0.98
	Planicie_Suave	20.33
	Moderado	10.18
	Fuerte	2.04
	Empinado	4.90
f	Agricola	0.68
	Area_Abierta	0.41
	Bosque	0.65
	Cultivos_Permanentes	0.14
	Cultivos_Transitorios	0.26
	Mineria	1.00

Parámetro	Categoría (Cobertura y uso de la tierra/Suelo/Pendiente)	Valor
	Pasto	0.62
	Cuerpo_Agua	1.00
	Urbano	1.00
	Planicie_Suave	0.13
	Moderado	0.50
	Fuerte	0.86
	Empinado	0.51
K_s	Fino	1.00
	Moderado	10.01
	Grueso	100.01
	Cuerpo_Agua	5.92
	Zona_Urbana	0.92
SWC	Fino	1,000.13
	Moderado	1,001.00
	Grueso	499.94
	Cuerpo_Agua	787.78
	Zona_Urbana	399.18

Fuente: Elaboración propia.

13.3. Población de bovinos y aves por municipio en el Departamento del Atlántico

En la sección 5.4.3 se presentó la metodología para la estimación de la demanda potencial para uso pecuario considerando la población de bovinos y aves. En la Tabla 60 se presenta la población de bovinos y aves por municipio según el censo agropecuario que realizó el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) para el año 2022.

Tabla 60. Población Bovinos y Aves en el Departamento del Atlántico para el año 2022

Municipio	Bovinos	Aves
Barranquilla	1,451	8,900
Baranoa	13,921	1,704,890
Campo De La Cruz	18,719	8,920
Candelaria	20,777	8,470
Galapa	3,808	1,223,500
Juan De Acosta	9,484	10,940
Luruaco	16,231	132,150
Malambo	5,941	1,183,000
Manatí	27,955	11,840
Palmar De Varela	4,991	45,337
Piojo	11,674	8,598
Polonuevo	6,635	1,235,788
Ponedera	16,707	583,386
Puerto Colombia	84	209,300
Repelón	11,439	347,850
Sabanagrande	4,489	1,220,009
Sabanalarga	45,870	1,915,284

Municipio	Bovinos	Aves
Santa Lucia	10,675	9,970
Santo Tomas	6,490	180,197
Soledad	2,246	5,530
Suan	5,305	9,160
Tubara	3,751	9,893
Usiacurí	7,380	11,634

Fuente: Instituto Agropecuario Colombiano (2022).

13.4. Capacitaciones y asistencias técnicas

A continuación, se presentan los resultados de las encuestas realizadas a los funcionarios de la CRA para medir su nivel de satisfacción con las capacitaciones realizadas y la validación de resultados y cambios requeridos en el modelo WEAP y las herramientas de visualización a partir de las asistencias técnicas.

13.4.1. Capacitación 1: Uso de WEAP

En esta sección se presentan los resultados de la encuesta realizada a los funcionarios de la corporación para la capacitación 1: Uso de WEAP. Las preguntas se enfocaron en la calificación de la capacitación del modelo WEAP, mejoras para próximas capacitaciones, si la información suministrada fue clara y las probabilidades de recomendar WEAP a otras entidades o colegas en el desarrollo de modelos de planificación y gestión del recurso hídrico.



4. Acorde a su rol en la CRA, ¿cómo y para qué utilizaría el modelo WEAP?

More Details

3
Responses

Latest Responses
"Para la toma de decisiones."
"Para consolidar toda la Información dls recurso hídrico del departamento "
"Para evaluar solicitudes de concesiones de agua y permisos de vertimientos."

5. En general, ¿cómo califica la capacitación en el modelo WEAP?

More Details

Promoters	2
Passives	1
Detractors	0



6. ¿Qué le gustó de la capacitación?

More Details

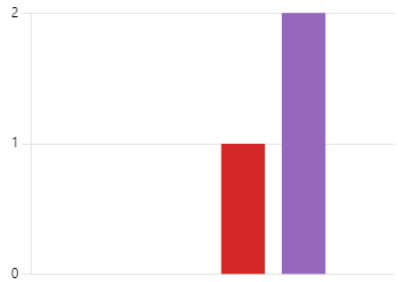
Temática	3
Metodología	2
Capacitadores	2
Formas de Visualización	2
Other	0



7. ¿Qué podemos mejorar para próximas capacitaciones?

More Details

Temática	0
Metodología	0
Capacitadores	0
Formas de Visualización	1
Nada	2
Other	0



8. ¿La información suministrada en esta capacitación fue clara? En caso negativo, ¿Cuál tema necesita clarificación?

More Details

3
Responses

Latest Responses
"Fue clara."
"Muy clara "
"Muy clara."

9. ¿Qué probabilidades hay de que recomiendes a SEI a colegas?

More Details

Promoters	3
Passives	0
Detractors	0



10. ¿Qué probabilidades hay de que recomiendes el uso de WEAP en modelos de planificación y gestión del recurso hídrico?

More Details

Promoters	3
Passives	0
Detractors	0



13.4.2. Taller b: Validación de datos de entrada al modelo WEAP

En esta sección se presentan los resultados de la encuesta realizada a los funcionarios de la CRA al finalizar la asistencia técnica 1. En esta encuesta se midió el nivel de satisfacción de la aplicación de temas relacionados con la construcción del modelo WEAP para el desarrollo de la ERA en el Atlántico.

1. Correo Electronico

More Details

4
Responses

Latest Responses
"idelahoz1@gamil.com"
"arojano@crautonoma.gov.co"
"egonzalez@crautonoma.gov.co"

2. Nombre y Apellido

More Details

4
Responses

Latest Responses
"Ignacio De la Hoz"
"Ayari María Rojano Marin"
"Elías González Vallejo"

3. ¿Cuál es su rol dentro de la Corporación?

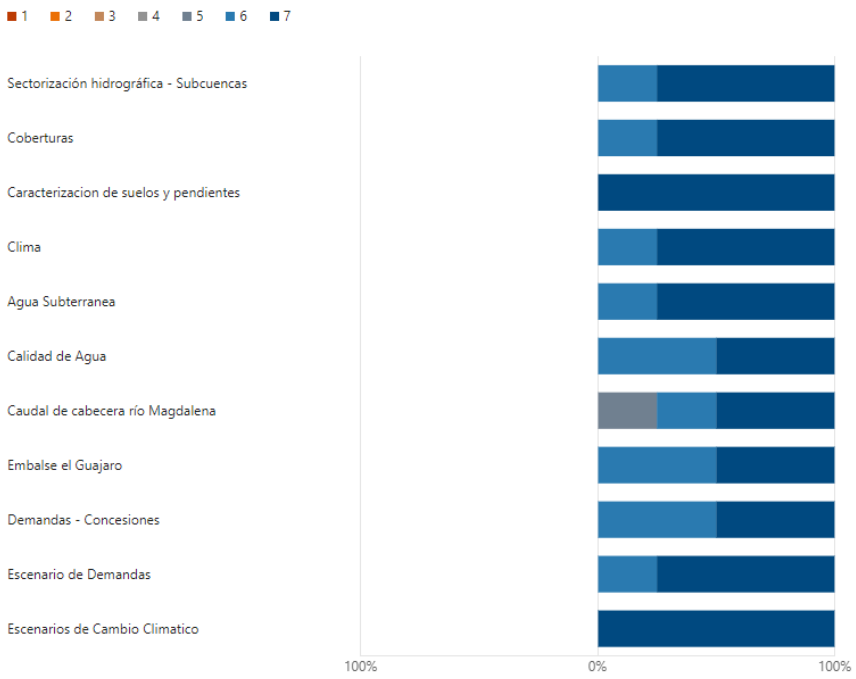
More Details

4
Responses

Latest Responses
"Esp. Hidraulica"
"Asesora de Dirección en GIRH"
"Profesional Universitario"

4. Califique de 1 a 7, donde 1 es la calificación mas baja, y 7 la más alta, el nivel de satisfacción de como se aplicaron los siguientes temas en la construcción del modelo WEAP para el desarrollo de la Evaluación Regional del Agua en el Atlántico

More Details



5. ¿La información suministrada que se incluyo dentro del modelo fue clara? En caso contrario, ¿qué temática faltó abordar con mayor detalle?

More Details

4
Responses

Latest Responses

"Fue Clara"

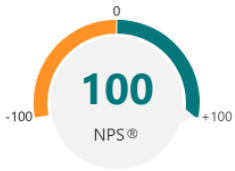
"Fue muy clara"

"Sí, aunque se recomienda tener en cuenta los reusos de aguas residuales tr..."

6. ¿Qué probabilidades hay de que recomiendes el uso de WEAP a otras corporaciones para la evaluación de Indicadores relacionados con la gestión y planificación del recurso hídrico como los de la ERA?

More Details

Promoters	4
Passives	0
Detractors	0



13.4.3. Capacitación 2: Herramientas ERA TOOL R y ERA CRA ArcGIS Experience

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación realizada por los funcionarios de la CRA a la capacitación de las herramientas ERA TOOL R y ERA CRA ArcGIS Experience enfocándose en su utilidad para la toma de decisiones y las funcionalidades y formas de visualización que ofrecen.

1. Correo Electronico

More Details

4
Responses

Latest Responses
"idelahoz1@gmail.com"
"egonzalez@crautonoma.gov.co"
"arojano@crautonoma.gov.co"

2. Nombre y Apellido

More Details

4
Responses

Latest Responses
"Ignacio De la Hoz"
"Elías González Vallejo "
"Ayari Rojano Marin"

3. ¿Cuál es su rol dentro de la Corporación?

More Details

4
Responses

Latest Responses
"Esp. Hidraulica"
"Profesional Universitario "
"Asesora "

4. En general, ¿cómo califica la herramienta ERA TOOL R para la toma de decisiones dentro de su rol en la CRA?

More Details

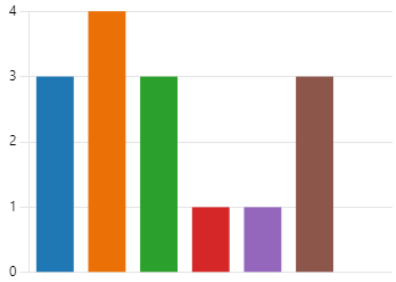
Promoters	4
Passives	0
Detractors	0



5. ¿Qué le gustó de la herramienta ERA-TOOL R? Seleccione una o varias opciones

More Details

Interfaz Visual	3
Mapas	4
Graficos y Tablas	3
Facilidad de Manejo	1
Que sea de libre acceso	1
Que sea actualizable con el tiem...	3
Other	0



6. ¿Qué información, pestañas o funciones adicionales le gustaría ver dentro de la herramienta ERA-TOOL R?

More Details

4
Responses

Latest Responses

"Graficas amigables para facilitar análisis "

"Está perfecta."

"Así está Perfecto "

7. En general, ¿cómo califica la herramienta ArcGIS Experience para la toma de decisiones y sustentación a diversos públicos?

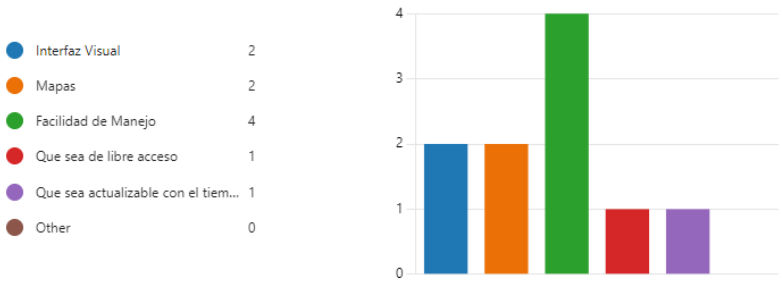
More Details

Promoters	4
Passives	0
Detractors	0



8. ¿Qué le gustó de la herramienta ArcGIS Experience? Seleccione una o varias opciones

More Details



9. ¿Qué información adicional le gustaría ver dentro de la herramienta ArcGIS Experience?

More Details

4
Responses

Latest Responses
"Información hidrológica general... graficos"
"Está bien."
"Esta Perfecto "

10. ¿La información suministrada de las herramientas fue clara? En caso negativo, ¿Cuál tema necesita clarificación?

More Details

4
Responses

Latest Responses
"Fue clara"
"Muy clara."
"Si"

11. ¿Qué probabilidades hay de que recomiendes el uso de estas herramientas para la visualización de los resultados modelos para le gestión del recurso hídrico como la ERA a otras entidades/corporaciones?

More Details



13.4.4. Taller c: Validación indicadores ERA en el Atlántico

En esta sección se presentan los resultados de la encuesta realizada a los funcionarios de la CRA para la validación de los resultados obtenidos en cada uno de los indicadores de la ERA en el Departamento del Atlántico. Los comentarios adicionales respecto a cada indicador fueron atendidos y se explicaron a lo largo de este informa en cada sección a la cual correspondía.

1. Correo electrónico

More Details

4
Responses

Latest Responses
"idelahoz1@gmail.com"
"ipelaez@crautonoma.gov.co"
"arojano@crautonoma.gov.co"

2. Nombre y apellido

More Details

4
Responses

Latest Responses
"Ignacio De la Hoz"
"Iván Peláez "
"Ayari Rojano Marin"

3. ¿Cuál es su rol dentro de la Corporación?

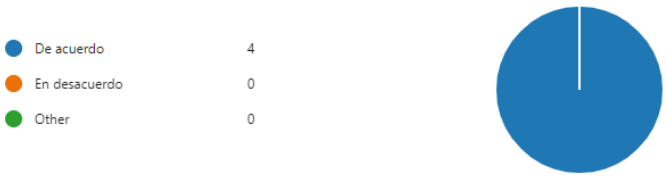
More Details

4
Responses

Latest Responses
"Esp. Hidraulico "
"Contratista "
"Asesora de Direccion"

4. ¿Está de acuerdo con los resultados del Indicador IRH?

More Details



5. ¿Tiene consideraciones o comentarios adicionales con respecto a este indicador [IRH]?

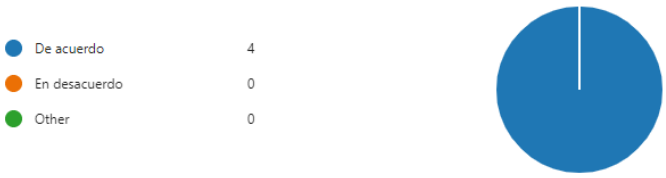
More Details

3
Responses

Latest Responses
"No"
"No"

6. ¿Está de acuerdo con los resultados del Indicador IA?

More Details



7. ¿Tiene consideraciones o comentarios adicionales con respecto a este indicador [IA]?

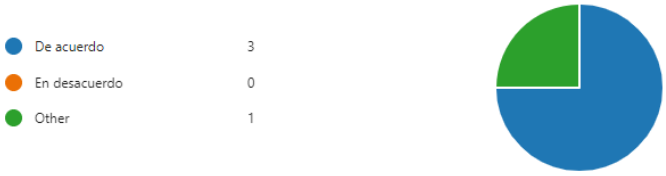
More Details

3
Responses

Latest Responses
"No"
"No"

8. ¿Está de acuerdo con los resultados del Indicador IVICAS?

More Details



9. ¿Tiene consideraciones o comentarios adicionales con respecto a este indicador [IVICAS]?

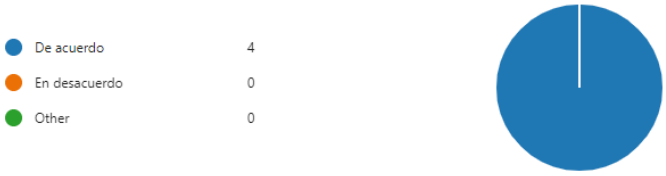
More Details

3
Responses

Latest Responses
"No"
"No"

10. ¿Está de acuerdo con los resultados del Indicador IUA?

More Details



11. ¿Tiene consideraciones o comentarios adicionales con respecto a este indicador [IUA]?

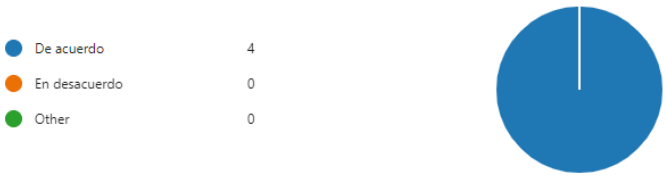
More Details

3
Responses

Latest Responses
"No"
"Es necesario eliminar las concesiones sobre lago el cisne "

12. ¿Está de acuerdo con los resultados del Indicador IEAS?

More Details



13. ¿Tiene consideraciones o comentarios adicionales con respecto a este indicador [IEAS]?

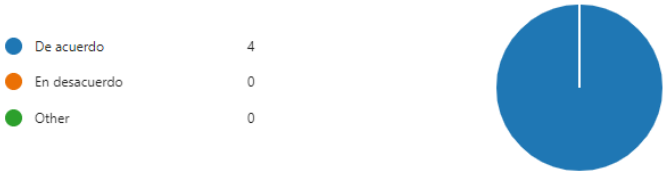
More Details

3
Responses

Latest Responses
"Tener en cuenta que las concesiones de aguas subterráneas las maneja Barr..."
"No"

14. ¿Está de acuerdo con los resultados del Indicador IASAP?

More Details



15. ¿Tiene consideraciones o comentarios adicionales con respecto a este indicador [IASAP]?

More Details

3
Responses

Latest Responses
"No"
"No"

16. ¿Está de acuerdo con los resultados del Indicador IIUA?

More Details



17. ¿Tiene consideraciones o comentarios adicionales con respecto a este indicador [IIUA]?

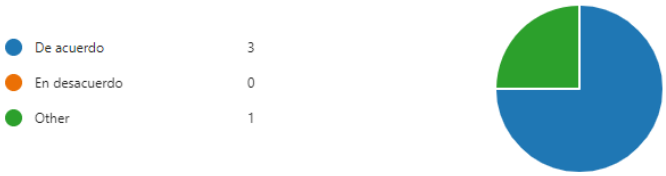
More Details

3
Responses

Latest Responses
"No"
"No"

18. ¿Está de acuerdo con los resultados del Indicador IVH?

More Details



19. ¿Tiene consideraciones o comentarios adicionales con respecto a este indicador [IVH]?

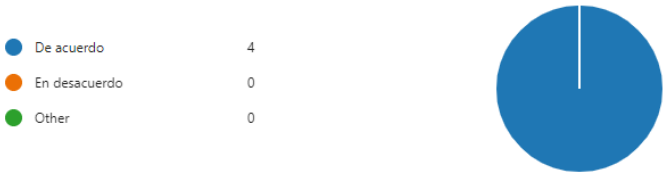
More Details

2
Responses

Latest Responses
"No"

20. ¿Está de acuerdo con los resultados del Indicador IVET?

More Details



21. ¿Tiene consideraciones o comentarios adicionales con respecto a este indicador [IVET]?

More Details

3
Responses

Latest Responses
"No"
"No"