



@Jonathannogales

CARACTERIZACIÓN DE ATRIBUTOS ECOLÓGICOS CLAVE E ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD PARA LA CONSERVACIÓN DE LA CUENCA DEL ORINOCO EN COLOMBIA



CARACTERIZACIÓN DE ATRIBUTOS ECOLÓGICOS CLAVE E ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD PARA LA CONSERVACIÓN DE LA CUENCA DEL ORINOCO EN COLOMBIA.

Tomo I: Índice de sostenibilidad de cuencas y áreas prioritarias para la conservación

The Nature Conservancy (TNC)
Accelerating Impact Funds

Grupo Técnico y de Investigación

Dirección de técnico y de investigación

Carlos Andrés Rogéliz Prada, Director de investigación,
Integrated water resource management leader (TNC)

Equipo técnico y de investigación

Carlos Andrés Rogéliz Prada, Investigador, Integrated water resource management leader (TNC)
Jonathan Nogales Pimentel, Investigador, Hydrology Specialist (TNC)
Leonardo Albornoz Villarraga, Hydroinformatic Specialist (TNC)
Miguel Ángel Cañón Ramos, Investigador, Hydrology Specialist (TNC)
Lina María Abella Castaño, Investigadora, Specialist in Integrated Basin Analysis (TNC)



Financiación

El desarrollo de esta investigación ha sido posible gracias a los fondos del Accelerating Impact Fund Initiative de The Nature Conservancy.



Tabla de contenido

1	Introducción	1
2	Metodología	3
3	Área de estudio.....	7
4	Unidades de análisis espacial	8
4.1	Microcuencas	9
4.1.1	Identificación de Nodos Hidrológicos.....	9
4.1.2	Identificación de Knickpoints	10
4.1.3	Microcuencas.....	12
4.2	Subcuencas	13
5	Valores de conservación	14
5.1	Biológicos	14
5.1.1	Especies de peces	14
5.1.2	Especies de anfibios y reptiles	16
5.1.3	Especies de aves acuáticas.....	18
5.1.4	Especies de mamíferos acuáticos.....	20
5.1.5	Especies en categoría de amenaza	21
5.1.6	Especies de megafauna.....	25
5.1.7	Corredores migratorios.....	27
5.1.8	Áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad de agua dulce	33
5.2	Servicios ecosistémicos	35
5.2.1	Especies de agua dulce de uso ornamental.....	36
5.2.2	Especies de agua dulce de consumo.....	38
5.2.3	Recreación y turismo.....	40
5.3	Áreas de valores culturales.....	43
5.3.1	Resguardos indígenas.....	43
5.3.2	Consejos comunitarios – Comunidades Afro.....	44
5.3.3	Reservas campesinas	45
5.3.4	Áreas de valor arqueológico.....	46
5.4	Áreas de valor espiritual.....	47
6	Identificación KEAs, amenazas y sus fuentes.....	49
6.1	Minería	50
6.2	Exploración y explotación de petróleo y gas.....	51

6.3	Ampliación frontera agrícola y pecuaria.....	52
6.4	Deforestación.....	54
6.5	Contaminación fuentes de agua dulce	54
6.6	Cambio climático.....	55
7	Indicadores de atributos para grupos de agua dulce.....	55
7.1	Régimen hidrológico.....	55
7.2	Flujo de sedimentos.....	57
7.3	Calidad del agua.....	57
7.4	Estructura física.....	58
7.5	Conectividad	58
8	Indicadores de integridad.....	60
8.1	Régimen hidrológico y flujo de sedimentos.....	60
8.2	Calidad del agua.....	61
8.3	Estructura física.....	62
8.4	Conectividad	62
9	Caracterización de KEA	62
9.1	KEA – Régimen hidrológico.....	62
9.1.1	Caracterización climática – Histórica	63
9.1.1.1	Selección de estaciones.....	64
9.1.1.2	Consistencia y calidad de información.....	65
9.1.1.3	Detección de datos anómalos.....	66
9.1.1.4	Variabilidad climática e hidrológica.....	67
9.1.2	Caracterización climática – Cambio climático	85
9.1.2.1	Sexto informe IPCC y escenarios SSP	85
9.1.2.2	Modelos de circulación global.....	87
9.1.2.3	Escenarios de cambio climático.....	89
9.1.2.4	Downscaling – corrección de sesgo	89
9.1.2.5	Análisis escenarios cambio climático	90
9.1.2.6	Ensamble climático	93
9.1.3	Modelo matemático hidrológico	99
9.1.4	Construcción del modelo hidrológico.....	103
9.1.4.1	Series de precipitación y evapotranspiración	103
9.1.4.2	Áreas de humedales.....	106

9.1.4.3	Componente de demandas del modelo hidrológico.....	106
9.1.5	Esquema de calibración y validación del modelo hidrológico	117
9.1.6	Desempeño del modelo y análisis de sensibilidad e incertidumbre paramétrica.....	124
9.1.7	Simulación de caudales en unidades hidrológicas de análisis	127
9.1.8	Indicadores de atributo.....	136
9.1.9	Indicadores de integridad.....	138
9.2	KEA – Flujo de sedimentos.....	139
9.2.1	Configuración del modelo CASCADE.....	141
9.2.1.1	Caudal de banca llena.....	142
9.2.1.2	Tamaño medio de partícula – D50.....	145
9.2.1.3	Parámetros hidráulicos (ancho, profundidad y velocidad)	150
9.2.1.4	Exportación de sedimentos de la cuenca.....	152
9.2.1.5	Erosividad de la lluvia (R).....	153
9.2.1.6	Erodabilidad del suelo (K).....	153
9.2.1.7	Factor de cobertura vegetal (C) y de prácticas (P)	155
9.2.2	Esquema de calibración del modelo RUSLE.....	155
9.2.3	Indicadores de atributo.....	157
9.2.4	Indicadores de integridad.....	158
9.3	KEA – Calidad del agua.....	159
9.3.1	Configuración del modelo MCAES.....	166
9.3.2	Características físicas del río	166
9.3.3	Fuentes de contaminación	167
9.3.3.1	Sector agrícola.....	167
9.3.3.2	Sector pecuario	168
9.3.3.3	Sector doméstico	168
9.3.3.4	Sector de hidrocarburos	169
9.3.3.5	Sector minero.....	169
9.3.4	Cargas presuntivas.....	170
9.3.4.1	Sector agrícola.....	170
9.3.4.2	Sector pecuario	171
9.3.4.3	Sector doméstico	172
9.3.4.4	Sector de hidrocarburos	172
9.3.4.5	Sector minero.....	173

9.3.5	Calidad del agua de la VRO	174
9.3.6	Indicador de atributo	180
9.3.7	Indicador de integridad.....	182
9.4	KEA – Estructura física.....	183
9.4.1	Indicadores de atributo.....	184
9.4.2	Indicadores de integridad.....	185
9.5	KEA – Conectividad	196
9.5.1	Indicadores de atributo.....	196
9.5.2	Indicadores de integridad.....	197
10	Grupos de agua dulce.....	198
11	Rareza	200
12	Conectividad.....	201
13	Integridad	202
14	Importancia.....	204
15	Complementariedad	206
16	Representatividad.....	207
17	Oportunidades de conservación (Portafolio).....	208
18	Portafolio de conservación bajo esquema de priorización.....	210
19	Conclusiones.....	213
20	Referencias	215

Listado de Figuras

Figura 1. Marco metodológico para la construcción del portafolio de conservación para ecosistemas de agua dulce en la VRO	3
Figura 2. Área de estudio VRO	7
Figura 3. Nodos hidrológicos de la VRO	10
Figura 4. Cálculo del gradiente de la corriente	11
Figura 5. Ejemplo de gradientes de corrientes	11
Figura 6. Knickoints identificados en la VRO	12
Figura 7. Microcuencas definidas para la cuenca de la VRO.....	13
Figura 8. Subcuencas definidas para la VRO	13
Figura 9. Distribución riqueza de especies de peces consideradas como valor de conservación en la VRO.....	16
Figura 10. Distribución riqueza de especies de anfibios consideradas como valor de conservación en la VRO.....	18
Figura 11. Distribución riqueza de especies de reptiles consideradas como valor de conservación en la VRO.....	18
Figura 12. Distribución riqueza de especies de aves acuáticas consideradas como valor de conservación en la VRO	20
Figura 13. Distribución riqueza de especies de mamíferos acuáticos consideradas como valor de conservación en la VRO.....	21
Figura 14. Categorías de amenaza de acuerdo con la Lista Roja de UICN	22
Figura 15. Distribución riqueza de especies amenazadas en la VRO	25
Figura 16. Riqueza megafauna aguadulce a escala global	26
Figura 17. Distribución riqueza de megafauna para la cuenca del río Orinoco	26
Figura 18. Especies de peces migratorias con valor pesquero.....	29
Figura 19. Fichas de dos especies migratorias en condición de amenaza	30
Figura 20. Registros de GBIF, raudales y áreas potenciales de migración por elevación	32
Figura 21. Perfil de elevación del Raudal Las Chulas.....	32
Figura 22. Corredores migratorios de especies dulceacuícolas.....	33
Figura 23. Áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad para la VRO....	35
Figura 24. Distribución riqueza de especies de peces de uso ornamental consideradas como valor de conservación en la VRO.....	38
Figura 25. Distribución de riqueza de especies de consumo consideradas como valor de conservación en la VRO	40
Figura 26. Parque Nacional Natural El Tuparro	41
Figura 27. Caño Cristales, Meta.....	41

Figura 28. Cerros de Mavecure, Inírida.....	42
Figura 29. Promedio días de usuario de fotografías por año en la VRO.....	43
Figura 30. Distribución áreas culturales en la VRO.....	47
Figura 31. Distribución áreas espirituales – sitios sagrados en la VRO	49
Figura 32. Títulos mineros presentes en la VRO	51
Figura 33. Número de barriles producidos por departamento entre el año 2022 y 2023	52
Figura 34. Bloques de exploración petrolera en la VRO.....	52
Figura 35. Coberturas territorios agrícolas de la VRO	53
Figura 36. Mapa de cambio de coberturas para la VRO.....	54
Figura 37. Ejemplos de firmas hidrológicas de uso común calculadas como métricas de las series temporales de caudales	56
Figura 38. Representación esquemática de la variación del DCI	59
Figura 39. Esquematzación de la curva de duración de caudales	61
Figura 40. Representación esquemática del cálculo de los dos grupos de índices de régimen hidrológico.....	63
Figura 41. Mapa de estaciones seleccionadas en la VRO	65
Figura 42. Estaciones que cumplen criterios de consistencia por variable.....	66
Figura 43. Cantidad de estaciones por rango de porcentaje de anómalos.....	67
Figura 44. Componentes concepto variabilidad hidro climática.....	67
Figura 45. Valor medio mensual de precipitación para la estación Vuelta Mala 35260050.....	69
Figura 46. Distribución espacial de la precipitación total media mensual multianual para la VRO.....	69
Figura 47. Distribución espacial del valor anual para precipitación total	70
Figura 48. Valor medio mensual de temperatura para la estación Paz de Ariporo 36015010.....	71
Figura 49. Esquematzación del procedimiento para generación de campos de temperatura.....	71
Figura 50. Distribución espacial de la temperatura media mensual multianual para la VRO	72
Figura 51. Valor medio mensual de temperatura máxima para la estación Paz de Ariporo 36015010...73	73
Figura 52. Distribución espacial de la temperatura máxima mensual multianual para la VRO	73
Figura 53. Valor medio mensual de temperatura mínima para la estación Paz de Ariporo 36015010...74	74
Figura 54. Distribución espacial de la temperatura mínima mensual multianual para la VRO.....	74
Figura 55. Valor medio mensual de evaporación para la estación Tuparro bocas-Tamo 34035010.....75	75
Figura 56. Tendencia para la variable de precipitación total correspondiente a la estación Vuelta Mala 35260050.....	76
Figura 57. Tendencia por conjuntos estadísticos precipitación total para la estación Vuelta Mala 35260050.....	76

Figura 58. Tendencia para la variable de temperatura media de la estación Aeropuerto Santiago Pérez (37055010)	77
Figura 59. Tendencia por conjuntos estadísticos para temperatura media de la estación Aeropuerto Santiago Pérez (37055010)	77
Figura 60. Resultado autocorrelación precipitación total para determinar inercia.....	78
Figura 61. Resultado autocorrelación temperatura media para determinar inercia	79
Figura 62. Resultado de curvas de diferencias integrales para la variable de precipitación total a escala diaria, mensual y anual.	80
Figura 63. Resultado de curvas de diferencias integrales para la variable de temperatura media a escala diaria, mensual y anual.	80
Figura 64. Resultados tele conexiones para precipitación total estación Cumaribo 33055010.....	82
Figura 65. Resultados tele conexiones para temperatura media estación Cumaribo 33055010.....	83
Figura 66. Resultado ajuste a funciones de probabilidad para precipitación total estación Mandi 42050020.....	84
Figura 67. Resultado ajuste a funciones de probabilidad para temperatura media estación Mapiripana 32155010.....	85
Figura 68. Escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP)	86
Figura 69. Contribución al aumento de la temperatura global de la superficie a partir de los diferentes escenarios.....	86
Figura 70. Comportamiento anual de la precipitación para la estación Vuelta Mala 35260050.....	91
Figura 71. Comportamiento estacional de la precipitación para la estación Vuelta Mala 35260050.....	91
Figura 72. Comportamiento anual de la precipitación para la estación Paz de Ariporo 36015010.....	92
Figura 73. Comportamiento estacional de la precipitación para la estación Paz de Ariporo 36015010.....	93
Figura 74. Resultado ensamble para la variable de precipitación por los cuatro escenarios de cambio climático	95
Figura 75. Resultado ensamble para la variable de temperatura por los cuatro escenarios de cambio climático.....	96
Figura 76. Distribución espacial precipitación anual para escenarios cambio climático	97
Figura 77. Distribución espacial de la temperatura para escenarios cambio climático.....	98
Figura 78. Esquema conceptual del modelo MoHiTo.....	99
Figura 79. a) Representación esquemática del modelo de Thomas. b) esquema de acumulación de caudales de MoHiTo. c) esquema de interacción río planicie. En azul se esquematizan las planicies de inundación	101
Figura 80. Acumulación de demandas por unidad hidrológica. Los polígonos en verde y rojo representan las zonas de demandad de los diferentes sectores y en azul, se demarcan las planicies de inundación	102
Figura 81. Consideración del tipo de cobertura dentro del esquema de MoHiTo.....	103

Figura 82. Esquematización de asignación de series de precipitación para las unidades de modelación en la VRO	104
Figura 83. Series de precipitación para las unidades de modelación	104
Figura 84. Esquematización de asignación de series de temperatura para las unidades de modelación en la VRO	105
Figura 85. Series de evapotranspiración potencial para las unidades de modelación	105
Figura 86. Área de humedales presentes en la VRO.....	106
Figura 87. Distribución espacial de cultivos de palma de aceite en la VRO	108
Figura 88. Distribución espacial de arroz de aceite en la VRO	108
Figura 89. Distribución de la demanda hídrica (m ³) para cultivos de palma de aceite sobre la VRO..	109
Figura 90. Distribución de la demanda hídrica (m ³) para cultivos de arroz sobre la VRO.....	109
Figura 91. Distribución espacial de la población por UHA en la VRO	110
Figura 92. Distribución espacial de la demanda hídrica (m ³) para el sector doméstico en la VRO	110
Figura 93. Distribución de aves de engorde por UHA en la VRO.....	111
Figura 94. Distribución de bovinos (<1mes) por UHA en la VRO.....	111
Figura 95. Distribución de porcinos por UHA en la VRO.....	112
Figura 96. Distribución espacial de la demanda hídrica (m ³) para aves de engorde por UHA en la VRO	113
Figura 97. Distribución espacial de la demanda hídrica (m ³) para bovinos (<1mes) por UHA en la VRO.....	113
Figura 98. Distribución espacial de la demanda hídrica (m ³) para porcinos por UHA en la VRO	114
Figura 99. Producción de barriles por UHA por día en la VRO	115
Figura 100. Demanda hídrica para el sector hidrocarburos en la VRO	115
Figura 101. Distribución espacial de producción de arcilla en la VRO.	116
Figura 102. Demanda hídrica asociada a la producción de arcilla en la VRO.....	117
Figura 103. Distribución espacial de cuencas para calibración	118
Figura 104. Localización de las estaciones de caudal utilizadas para calibración.....	119
Figura 105. Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de calibración del modelo construido para la estación Aguaverde [35267080].	121
Figura 106. Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de validación del modelo construido para la estación Aguaverde [35267080]	121
Figura 107. Histograma del coeficiente de Nash - Sutcliffe. a) Calibración. b) Validación.	124
Figura 108. Dotty Plots y Curvas de sensibilidad paramétrica para Estación Aguaverde [35267080].	125

Figura 109. Análisis de incertidumbre mediante metodología GLUE - estación Aguaverde [35267080]	126
Figura 110. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición histórica.	128
Figura 111 Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo ACCESS-ESM1-5 - ssp585.....	129
Figura 112. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo CanESM5 – ssp585.....	130
Figura 113. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo CESM2 - ssp585.....	131
Figura 114. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo EC-Earth3 - ssp585	132
Figura 115. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo MIROC6 – ssp5	133
Figura 116. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo MPI-ESM1-2-LR – ssp5	134
Figura 117. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo MRI-ESM2-0 – ssp5.....	135
Figura 118. Distribución de magnitud del régimen hidrológico (Caudal medio anual) en la VRO	137
Figura 119. Distribución de duración del caudal alto en la VRO.....	137
Figura 120. Distribución de tasa de cambio del régimen hidrológico (Pendiente de la curva de duración del caudal) en la VRO	138
Figura 121. Distribución de tiempo del régimen hidrológico (Semestre de medio flujo) en la VRO...	138
Figura 122. Índice de integridad asociado al régimen hidrológico para la VRO.....	139
Figura 123. Representación del marco CASCADE.....	140
Figura 124. Representación esquemática del cálculo de los dos grupos de índices del flujo de sedimentos	140
Figura 125. Distribución espacial de las pendientes de los tramos de red fluvial de la VRO.....	142
Figura 126. Representación esquemática de la condición de banca llena para (a) bancos de canales de la misma elevación y (b) bancos de canales con diferentes elevaciones.	142
Figura 127. Localización de estaciones para obtención de Q2.33.....	143
Figura 128. PDF evaluadas para los caudales de la estación Aguaverde [35267080] (UHA-574), para los caudales máximos mensuales en la condición histórica	144
Figura 129. Relación entre el caudal de banca llena y el área acumulada de la cuenca hasta la estación de calibración.....	145
Figura 130. Distribución espacial de los caudales medios diarios máximos para el periodo de retorno de 2.33 años en la condición histórica.....	145
Figura 131. Criterio de clasificación propuesto por Flores et al. (2006).....	146

Figura 132. Zonas de la VRO consideradas con lechos de área y grava.....	147
Figura 133. Función del factor de corrección de la pendiente <i>FS</i> para ríos con lecho de arena	149
Figura 134. Distribución espacial de <i>D50</i> estimados en la VRO.....	150
Figura 135. Raudales y de controles geológicos presentes en la VRO	150
Figura 136. Tamaño medio de sedimento (<i>D50</i>), ancho de banca llena <i>Bbf</i> y profundidad del agua <i>Hbf</i>	151
Figura 137. Ancho de banca llena en la VRO	151
Figura 138. Velocidad de banca llena en la VRO	152
Figura 139. Profundidad de banca llena en la VRO.....	152
Figura 140. Erosividad de la lluvia para la VRO	153
Figura 141. a) Diagrama de clase textural tomados de FAO (2006), b) Valores del parámetro K obtenidos por McKague (2023).	154
Figura 142. Erodabilidad del suelo (t.ha.hr)/ (MJ.ha.mm)	154
Figura 143. a) Simulaciones de la ecuación RUSLE para múltiples valores de α . b) comportamiento de la función objetivo.....	156
Figura 144. Valores simulados vs. observados de exportación de sedimentos.....	156
Figura 145. Exportación promedio anual multianual de sedimentos en la VRO	157
Figura 146. Capacidad de transporte de sedimentos en la VRO	158
Figura 147. Integridad - KEA flujo de sedimentos en la VRO	158
Figura 148. Esquema conceptual de los procesos involucrados en la modelación de los determinantes de la calidad del agua en la VRO.....	159
Figura 149. Representación esquemática del cálculo de los dos grupos de índices de calidad del agua.....	161
Figura 150. Representación de microcuencas en un esquema gráfico.....	165
Figura 151. Área de cultivos y pastos en la cuenca de la VRO	168
Figura 152. Distribución espacial de la producción ilegal de oro en la VRO.....	169
Figura 153. Numero de aves por UHA en la VRO.....	174
Figura 154. Distribución espacial de concentración de solidos suspendidos totales en la VRO	174
Figura 155. Distribución espacial de temperatura del agua totales en la VRO	175
Figura 156. Distribución espacial de concentración de coliformes totales en la VRO	175
Figura 157. Distribución espacial de concentración de fósforo orgánico en la VRO.....	176
Figura 158. Distribución espacial de concentración de fósforo inorgánico en la VRO	176
Figura 159. Distribución espacial de concentración de nitrógeno orgánico en la VRO.....	177
Figura 160. Distribución espacial de concentración de nitratos en la VRO.....	177
Figura 161. Distribución espacial de concentración de nitrógeno amoniacal en la VRO	178

Figura 162. Distribución espacial de concentración de oxígeno disuelto en la VRO	178
Figura 163. Distribución espacial de concentración de oxígeno de saturación en la VRO.....	179
Figura 164. Distribución espacial de concentración de mercurio elemental en la VRO	179
Figura 165. Distribución espacial de concentración de mercurio divalente en la VRO	180
Figura 166. Distribución espacial de concentración de metilmercurio en la VRO	180
Figura 167. Cuenca del Orinoco y su tipología de aguas de acuerdo con la clasificación de Sioli (1965, 1975)	181
Figura 168. Tipologías de aguas de la VRO.....	182
Figura 169. KEA Calidad del Agua – Índice de integridad.....	183
Figura 170. Representación esquemática del cálculo de los dos grupos de índices de estructura física.....	184
Figura 171. Distribución espacial del Multiresolution Valley Bottom Flatness para la VRO	185
Figura 172. Distribución espacial de cauces confinados y no confinados en la VRO.....	185
Figura 173. Funciones clave que ocurren en cuencas inalteradas y los principales factores estresantes que afectan estas funciones.....	186
Figura 174. Kilómetros de vías	187
Figura 175. Número de pozos petroleros en la VRO	187
Figura 176. Área urbanizada en la VRO.....	188
Figura 177 Área quemada en la VRO	188
Figura 178 Área deforestada en la VRO.....	189
Figura 179. Humedales Transformados en la VRO	189
Figura 180. Ejemplos de diferentes respuestas entre la integridad de la cuenca y los factores estresantes de la cuenca	190
Figura 181. Distribución del estresor de kilómetros de vías.....	190
Figura 182. Distribución del estresor de área urbanizada.....	191
Figura 183. Distribución del estresor de áreas quemadas.....	191
Figura 184. Distribución del estresor de áreas de minería.....	192
Figura 185. Distribución del estresor de densidad de pozos petroleros	192
Figura 186. Distribución del estresor de áreas de minería.....	193
Figura 187. Distribución del estresor de humedales transformados.....	193
Figura 188. Comportamiento de la función logística, junto con el significado de sus parámetros.....	194
Figura 189. Función del estresor "Presencia de vías"	195
Figura 190. Índice de integridad de estructura física	196
Figura 191. KEA Conectividad – Índice de atributo.....	197
Figura 192. KEA Conectividad – Índice de integridad.....	197

Figura 193. Taxonomía de enfoques de agrupación.....	198
Figura 194. Dendrograma de agrupamiento jerárquico	199
Figura 195. Esquema metodológico para la identificación de grupos de agua dulce.....	199
Figura 196. Grupos de agua dulce en la VRO.....	200
Figura 197. Longitud de ríos en función de los grupos de agua dulce	200
Figura 198. Rareza de los grupos de agua dulce en la VRO.	201
Figura 199. Indicador de conectividad para optimización.....	202
Figura 200. Integridad total de la VRO a nivel de microcuencas	203
Figura 201. Distribución del índice de riqueza ponderado por rareza en la VRO	205
Figura 202. Importancia de microcuencas en la VRO.....	206
Figura 203. Áreas de conservación dentro de la VRO.....	207
Figura 204. Representatividad total a nivel de microcuencas para la VRO.....	208
Figura 205. Diagrama de dispersión 2D para definición de oportunidades de conservación	208
Figura 206. Oportunidades de conservación de la VRO.....	209
Figura 207. Variación de la cantidad de islas en función del parámetro de penalidad del índice de conectividad.....	210
Figura 208. Variación de la representatividad respecto de los objetivos de conservación.	211
Figura 209. Variación de los índices de representatividad, rareza, importancia e integridad en función de los objetivos de conservación	211
Figura 210. Portafolio de conservación de la VRO bajo esquema de priorización.....	212

Listado de Tablas

Tabla 1. Especies de peces presentes en la VRO.....	15
Tabla 2. Especies de peces consideradas como valores de conservación en la VRO.....	15
Tabla 3. Especies de anfibios y reptiles presentes en la VRO	17
Tabla 4. Especies de anfibios y reptiles consideradas como valores de conservación en la VRO	17
Tabla 5. Especies de aves presentes en la VRO.....	19
Tabla 6. Especies de aves acuáticas consideradas como valores de conservación en la VRO	19
Tabla 7. Especies de mamíferos presentes en la VRO	21
Tabla 8. Especies de mamíferos consideradas como valores de conservación.....	21
Tabla 9. Categorías de la lista roja de especies amenazadas de la UICN	22
Tabla 10. Especies que presentan condición de amenaza según la lista roja de la UICN	23
Tabla 11. Listado de especies amenazadas por grupos y su categoría que se consideran como valor de conservación.....	24
Tabla 12. Tipo de migración para las 106 especies de peces dulceacuícolas con migración en Colombia	28
Tabla 13. Ejemplares de especies para uso ornamental en la VRO	37
Tabla 14. Lista de especies de peces de uso ornamental consideradas como valor de conservación en VRO.....	37
Tabla 15. Ejemplares de especies para consumo en la VRO	39
Tabla 16. Lista de especies de peces para consumo consideradas como valores de conservación en la VRO.....	39
Tabla 17. Grupos étnicos por departamento junto con la población total de indígenas presentes VRO	44
Tabla 18. Consejos comunitarios por departamentos presentes en la VRO	45
Tabla 19. Descripción de las zonas de reserva campesina presentes en la cuenca del río Orinoco.	46
Tabla 20. Descripción de sitios arqueológicos presentes en la VRO	47
Tabla 21. KEA, amenazas y fuentes para la VRO	50
Tabla 22. Firmas hidrológicas que describen el régimen de flujo	56
Tabla 23. Número de estaciones seleccionadas por variable	65
Tabla 24. Valores medios mensuales multianuales para precipitación total.....	68
Tabla 25. Valores medios mensuales multianuales temperatura media.....	70
Tabla 26. Valores medios mensuales multianuales temperatura máxima	72
Tabla 27. Valores medios mensuales multianuales temperatura mínima.....	74
Tabla 28. Valores medios mensuales multianuales de evaporación.....	75
Tabla 29. Índices océano atmosféricos.....	81

Tabla 30. Funciones de distribución de probabilidad teórica	83
Tabla 31. Coeficientes de cultivo (Kc) considerados para cada tipo de cultivo.....	107
Tabla 32. Módulos de consumo por tipo de animal.....	112
Tabla 33. Módulos de consumo por tipo de mineral	116
Tabla 34. Estaciones de calibración y periodos considerados para calibración y validación de los modelos hidrológicos.....	118
Tabla 35. Rangos para evaluar el desempeño de los modelos con el Nash-Sutcliffe.....	120
Tabla 36. Valores de los parámetros calibrados para el modelo construido junto con el valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe.....	122
Tabla 37. Rangos y valores de los índices de atributos para régimen hidrológico definidos para la agrupación de grupos de agua dulce en la VRO.....	136
Tabla 38. Parámetros de entrada de CASCADE	141
Tabla 39. Ecuaciones asociadas a parámetros hidráulicos de banca llena para ríos de grava y arena...	147
Tabla 40 Valores de D50 medidos para diferentes UHA en la VRO.....	148
Tabla 41. Factor de cobertura vegetal (C) para las categorías de la cobertura nacional a escala 1:100.000 Corine Land Cover nivel 2.....	155
Tabla 42. Clasificación de la capacidad del transporte de sedimentos.	157
Tabla 43. Formulación matemática de factores de asimilación para los determinantes de calidad del agua	162
Tabla 44. Características físicas de los tramos de río.....	167
Tabla 45. Coberturas de pastos y cultivos.....	168
Tabla 46. Producción de oro en la VRO.....	169
Tabla 47. Cálculo de cargas presuntivas por cobertura de la tierra.....	170
Tabla 48. Valores de carga presuntivas determinadas con las ecuaciones de la Tabla 47. Cálculo de cargas presuntivas por cobertura de la tierra.....	171
Tabla 49. Producción y composición de estiércol de diferentes tipos de estiércol	171
Tabla 50. Cargas presuntivas para bovinos y aves y cerdos	172
Tabla 51. Cargas presuntivas para población.....	172
Tabla 52. Cargas presuntivas para producción de hidrocarburos	172
Tabla 53. Factores de uso de agua en las fases productivas en hidrocarburos	173
Tabla 54. Cargas presuntivas para minería de oro.....	173
Tabla 55. Subíndices considerados para cada uno de los determinantes de la calidad del agua considerados en el índice de calidad del agua.	182
Tabla 56. Factores de estrés que afectan a la estructura física en la VRO.....	186
Tabla 57. Valores de los parámetros de la función de integridad	195

Tabla 58. Rangos y valores de los índices de atributos de conectividad definidos para la agrupación de grupos de agua dulce en la VRO.....	196
Tabla 59. Rangos de escalado de los índices de integridad.....	203

1 Introducción

En 2020, The Nature Conservancy lanzó la iniciativa "Accelerating Impact Funds" (AIF) con el objetivo de maximizar el impacto en la conservación mediante soluciones innovadoras y sostenibles. Esta iniciativa busca principalmente financiar proyectos que aborden problemas ambientales críticos y que puedan ser escalados para generar un impacto significativo en términos de conservación.

En 2022, desde la unidad de negocio de Colombia y en el marco de la iniciativa AIF, se desarrolló un portafolio de conservación para los ecosistemas de agua dulce en la cuenca amazónica del río Caquetá. La finalidad de este portafolio era contribuir efectivamente a la materialización de la Meta 3 del Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica, que tiene como propósito proteger y gestionar eficazmente el 30% de las zonas terrestres, interiores, costeras y marinas del mundo para 2030 (ONU, 2022). Uno de los resultados más importantes de ese proceso fue el desarrollo de un esquema metodológico robusto que sigue los lineamientos propuestos por Higgins et al. (2021) para la conservación de ecosistemas de agua dulce. Este esquema se materializó en la publicación científica titulada *An Integrated Methodological Framework for the Durable Conservation of Freshwater Ecosystems: A Case Study in Colombia's Caquetá River Basin* (Nogales et al., 2023).

Reconociendo la importancia de la vertiente del río Orinoco en Colombia (VRO) para la conservación de la biodiversidad de agua dulce y las comunidades que dependen de ella, The Nature Conservancy ha priorizado esta región en sus procesos de conservación para el año 2030. En el marco de la iniciativa AIF, se financió el proyecto AIF-Orinoquía, que busca contribuir a la conservación de 850,000 hectáreas de humedales y 3,000 km de ríos para 2025. Para lograrlo, el proyecto plantea generar un portafolio de conservación para los ecosistemas de agua dulce utilizando la metodología desarrollada en el anterior AIF del río Caquetá. Este portafolio orientará las prioridades de conservación y servirá como guía para la implementación de procesos de conservación efectivos.

Contar con un portafolio de conservación en la VRO es vital, ya que esta región es uno de los reservorios de biodiversidad más importantes del Neotrópico Gassón (2002), presentando una notable diversidad con 36 tipos de ecosistemas, incluidos bosques densos, bosques de galería y extensas sabanas tropicales Williams et al. (2020). Esta diversidad ecológica convierte a la VRO en una región de alta biodiversidad, albergando alrededor de 15,400 especies de plantas, de las cuales el 35% son endémicas, y más de 5,000 especies de animales, incluidas 650 especies de peces (The Nature Conservancy, 2019). Además, la VRO contiene el 49% de los humedales y el 32.4% de las reservas de agua dulce de Colombia, lo que la posiciona como una reserva crítica de recursos hídricos y de biodiversidad (CONPES 3797, 2017; IDEAM, 2019).

La metodología de Nogales et al. (2023) permite priorizar ecosistemas de agua dulce e identificar las mejores oportunidades de conservación. Este marco metodológico es altamente flexible, permitiendo configurarse según las características específicas de cada región. Utiliza esquemas de modelación y herramientas analíticas para caracterizar atributos ecológicos clave, establecer índices y valores de conservación, y determinar criterios y sus pesos relativos. Además, contribuye a mejorar las estrategias de conservación al incorporar elementos esenciales para la biodiversidad, como los servicios ecosistémicos y los valores culturales, que son cruciales para una conservación efectiva a largo plazo.

En línea con lo anterior, The Nature Conservancy es consciente de que estas ambiciosas metas no se pueden alcanzar individualmente, por lo que requiere articularse con otros actores en la VRO. Es por lo que otra de las apuestas que tiene el proyecto es incidir en los procesos de toma de decisiones, de manera que las autoridades ambientales (CARs) puedan conocer y utilizar el portafolio de conservación en los procesos de gestión territorial. Aprovechando que la metodología de Nogales et al. (2023) proporciona

una caracterización robusta de los Atributos Ecológicos Clave y traduce esta caracterización en un índice de integridad de los ecosistemas de agua dulce. The Nature Conservancy tiene como objetivo que las autoridades ambientales, como Corporinoquia y Cormacarena, adopten el índice de integridad en sus procesos de toma de decisiones como un indicador de sostenibilidad de cuencas para planificar de manera efectiva la VRO.

El enfoque del índice de sostenibilidad se fundamenta en el exitoso proceso realizado en el marco del convenio de asociación CORNARE – TNC Número C507-2020, cuyo objetivo fue llevar a cabo un estudio integral del recurso hídrico en las cuencas hidrográficas de los ríos Samaná Norte y Samaná Sur. Este estudio abarcó un análisis exhaustivo de la oferta y demanda de los recursos hídricos, así como de los servicios ecosistémicos asociados, con el fin de establecer criterios robustos para la toma de decisiones corporativas y la determinación de límites de sostenibilidad. Como resultado de este proceso, se desarrolló el Índice de Sostenibilidad Integrado (IdS), una herramienta metodológica que evalúa de manera integral los aspectos ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos de las cuencas. La metodología del IdS fue oficialmente adoptada por CORNARE en 2022, mediante el Acuerdo 424, y actualmente se aplica a todas las cuencas hidrográficas bajo su jurisdicción. Este enfoque ha permitido un manejo mejorado y sostenible de los recursos hídricos en todas las cuencas administradas por CORNARE, asegurando una gestión más efectiva y adaptativa de estos valiosos ecosistemas.

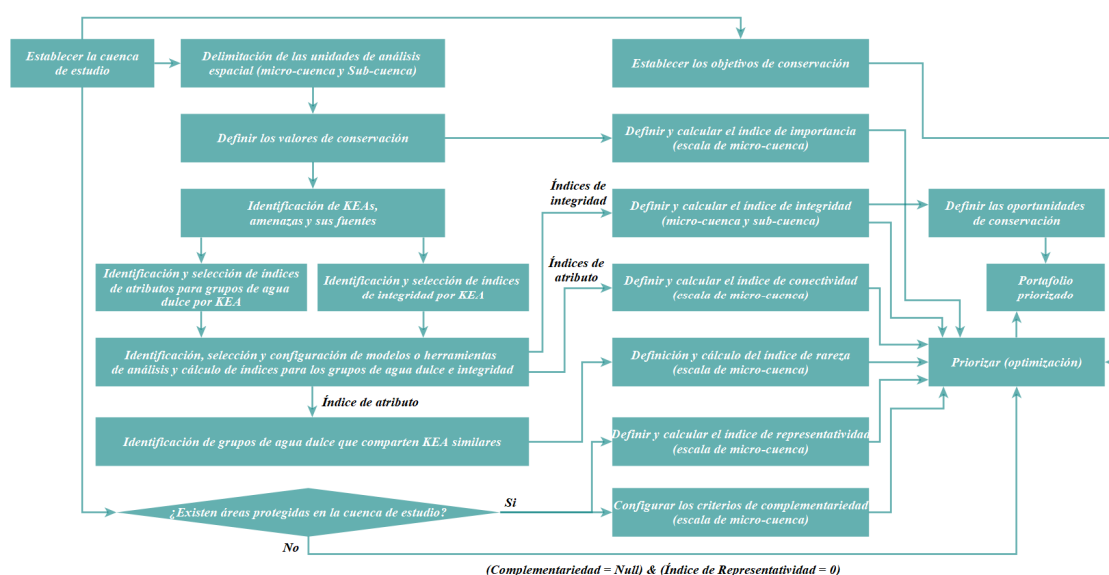
El hecho de que las autoridades ambientales adopten el índice de integridad en sus procesos de gestión es fundamental para lograr un manejo mejorado en los ecosistemas de agua dulce de la VRO, ya que a la fecha estos enfrentan múltiples amenazas que comprometen su integridad ecológica. Una de las principales amenazas es la expansión de la frontera agrícola, impulsada por la ley ZIDRES, que ha determinado que aproximadamente el 70% del área de la VRO es apta para el desarrollo agrícola, enfocándose en la producción de palma de aceite, soya y actividades silvopastoriles (López-Ricaurte et al., 2017; Roa & Rodríguez, 2017). Además, la región sufre una deforestación significativa, concentrándose el 70% en los departamentos de Meta, Caquetá, Guaviare y Putumayo, debido a la ganadería extensiva, la construcción de infraestructura vial y la extracción ilícita de minerales, resultando en la pérdida de más de 200,000 hectáreas anualmente (Portocarrero Aya and Lee, 2021). La exploración y explotación de petróleo y gas también contribuyen a la degradación ambiental, especialmente en los departamentos de Meta y Casanare, afectando las condiciones naturales del suelo y los cuerpos de agua (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2023). La contaminación de fuentes hídricas constituye otro problema grave, principalmente debido a las actividades agrícolas, ganaderas y mineras, que liberan grandes cantidades de agroquímicos y metales pesados en los cuerpos de agua (Pinzón and Fajardo Gómez, 2018). A todo esto, se suma el cambio climático, que amenaza con alterar el régimen hidrológico, provocando sequías extremas e inundaciones que afectan tanto a la biodiversidad como a las actividades productivas de la región (CORMACARENA et al., 2017).

En este contexto, el presente documento se centra en aplicar la metodología desarrollada por Nogales et al. (2023) en la VRO. El objetivo de este portafolio no solo busca orientar las prioridades de conservación de The Nature Conservancy hacia el 2030, sino también proporcionar a los tomadores de decisiones una herramienta integral para la planificación y gestión del territorio. Esto asegura un equilibrio sostenible entre el progreso económico y la conservación, garantizando así un futuro resiliente para la Orinoquia y sus comunidades. Además, este portafolio apoyará una adecuada planificación del territorio basándose en análisis multiescala, apoyados en mediciones y herramientas de modelización matemática, que permitirán analizar y evaluar prospectivamente los impactos en el territorio frente a futuras intervenciones. Este enfoque integral busca asegurar que las estrategias de conservación se implementen de manera efectiva, adaptándose a las condiciones cambiantes y garantizando la sostenibilidad a largo plazo de los valiosos ecosistemas de agua dulce de la VRO.

2 Metodología

El portafolio de conservación de ecosistemas de agua dulce para la VRO se genera a través del marco metodológico propuesto por Nogales et al. (2023). Este marco metodológico incorpora seis criterios comúnmente utilizados para la priorización (Kukkala and Moilanen, 2013; Linke and Hermoso, 2022; Valencia-Rodríguez et al., 2022): i) representatividad, que prioriza ecosistemas que no se encuentran ya bajo una figura de conservación (Ej, áreas protegidas); ii) integridad, que favorece a los ecosistemas con menor presión sobre sus KEAs; iii) importancia, que prioriza a los ecosistemas con mayores valores de conservación; iv) rareza, que promueve la selección de ecosistemas únicos; v) complementariedad, que da cuenta de las zonas de conservación existentes; y vi) conectividad, que promueve la conexión entre ecosistemas. La **Figura 1** representa esquemáticamente el marco metodológico propuesto por Nogales et al. (2023).

Figura 1. Marco metodológico para la construcción del portafolio de conservación para ecosistemas de agua dulce en la VRO



Fuente: Nogales et al. (2023)

Este marco planteado por Nogales et al. (2023) incorpora los criterios de protección duradera para ecosistemas de agua dulce descritos por Higgins et al. (2021). A continuación, se detallan cada uno de sus pasos:

1. **Establecer la cuenca de estudio:** Este primer paso consiste en definir el área de estudio, recopilar toda la información secundaria y definir las campañas de campo necesarias para el estudio. En esta fase también se identifica la existencia de áreas protegidas previamente establecidas en la zona de estudio, ya que los criterios de representatividad y complementariedad dependen de esta información.
2. **Establecer los objetivos de conservación:** La definición de objetivos de conservación sirve para varios fines. Por ejemplo, facilita la selección de la superficie mínima necesaria para representar y garantizar la persistencia de los valores de conservación (Linke et al., 2011). Estos objetivos pueden establecerse teniendo en cuenta las limitaciones económicas relacionadas con la inversión en acciones, o pueden ser simplemente producto de las metas específicas de una organización o grupo de organizaciones (Téllez et al., 2011). En este marco metodológico, los

objetivos de conservación se establecen como criterios de entrada para la priorización (véase el paso 17), lo que permite a los conservacionistas abordar cuestiones o intereses específicos.

3. **Delimitación de las unidades de análisis espacial:** Particularmente, esta etapa consiste en delimitar a través de un modelo digital de elevación del terreno las unidades de análisis y los segmentos fluviales entre dos nodos consecutivos dentro de las unidades. Este enfoque produce una representación gráfica del área de estudio que define la conectividad entre las unidades, lo que facilita cálculos acumulativos eficientes (aspectos importantes para los pasos 8, 11 y 17). Dado que el marco utiliza el método de Riato et al. (2020) para seleccionar las acciones de conservación (véase el Paso 16) utilizando el criterio de integridad, se deben delimitar microcuencas y subcuencas como escalas de análisis. Las escalas se basan en las cuencas, ya que son unidades apropiadas para la PSC de los ecosistemas de agua dulce (Dorji et al., 2020; Linke and Hermoso, 2022; Nogueira et al., 2023; Tognelli et al., 2019).
4. **Definir los valores de conservación:** Este paso consiste en identificar las especies, los servicios ecosistémicos y los valores culturales y espirituales que son importantes de conservar (Higgins et al., 2021). Es importante destacar que la metodología incluye los valores de conservación en el índice numérico de importancia (en el paso 13), por tanto, también se deben identificar las fuentes y el tipo de información para la traducción de los valores a indicadores.
5. **Identificación de los atributos ecológicos claves (KEAs), amenazas y sus fuentes:** Las KEAs son características esenciales para el mantenimiento de los ecosistemas de agua dulce y, por tanto, para los valores de conservación (Higgins et al., 2021). Este paso es crucial porque estas decisiones determinarán los índices, modelos o herramientas de análisis que se utilizarán en el estudio.
6. **Identificación y selección de índices de atributos para grupos de agua dulce por KEA:** Un grupo de agua dulce es un conjunto de unidades de planificación, o microcuencas, que poseen KEA similares. En este sentido, los grupos de agua dulce pueden entenderse como colecciones de hábitats dentro de una cuenca. El marco emplea índices de atributo sencillos para cada KEA, lo que permite diferenciar las zonas con KEA únicos sin requerir grandes cantidades de información para su configuración. Los grupos de agua dulce son de gran importancia ya que el marco los entiende como los hábitats de agua dulce presentes en la cuenca. Además, los criterios de rareza y representatividad se derivan de estos grupos.
7. **Identificación y selección de índices de integridad por KEA:** La metodología considera la integridad como la capacidad de una cuenca para soportar y mantener la amplia gama de procesos y funciones ecológicas esenciales tanto para la sostenibilidad de la biodiversidad como para los recursos y servicios que la cuenca proporciona a la sociedad (Flotemersch et al., 2016). Sobre la base de esta definición, la metodología utiliza índices para evaluar cómo las amenazas identificadas (en el paso 5) pueden afectar a los KEA y a su vez a la integridad de los ecosistemas.
8. **Identificación, selección y configuración de modelos o herramientas de análisis y cálculo de índices para los grupos de agua dulce e integridad:** La selección de modelos y herramientas de análisis se basa en los índices definidos para los grupos de agua dulce y de integridad. Las herramientas seleccionadas deben ser sensibles a las amenazas identificadas en cada KEA. La Metodología es flexible y permite la adopción de diferentes enfoques y estrategias, como un enfoque conceptual (Thornbrugh et al., 2018), aprendizaje automático (Subhasis Giri et al., 2019), modelos empíricos o una combinación de estos (Einheuser et al., 2013). Además, es posible seleccionar herramientas individuales para cada KEA o utilizar la misma herramienta para modelar múltiples KEA.

Una vez elegidos los modelos y las herramientas de análisis, esta etapa también incluye la recopilación y el procesamiento de la información necesaria para construir los modelos, la configuración y ejecución de los modelos seleccionados, y el cálculo de los índices correspondientes.

9. **Identificación de grupos de agua dulce que comparten KEA similares:** En este paso, los índices de atributos definidos se utilizan para agrupar las unidades de planificación con el fin de identificar grupos de agua dulce. Se pueden utilizar diferentes enfoques de agrupación para lograr esto, incluidos los métodos jerárquicos, particionales, de cuadrícula, basados en la densidad o basados en modelos (Saxena et al., 2017). La selección del método dependerá de las características (cualitativas o cuantitativas) de los índices de atributos seleccionados en el paso 6. Los grupos de agua dulce son fundamentales en este esquema metodológico, ya que se entienden como la colección de hábitats de ecosistemas de agua dulce dentro de la cuenca de análisis. Por tanto, constituyen el objeto de priorización y de conservación. Como se verá en el numeral 17, lo que se busca con esta metodología es generar corredores conectados de microcuencas de alto valor de conservación que alberguen la mayor diversidad posible de grupos de agua dulce (criterio de representatividad) e incluyan los grupos de agua dulce más raros (criterio de rareza).
10. **Definición y cálculo del índice de rareza:** La rareza es una medida de la singularidad o escasez de un determinado grupo de agua dulce dentro de la cuenca de estudio, o de la proporción o superficie ocupada por ese grupo en comparación con el resto de los grupos presentes en la cuenca. La rareza es un criterio en el proceso de priorización, como se describe en el paso 17. Así, en esta fase, se construye un índice que refleja la rareza de cada grupo de agua dulce en la cuenca utilizando una fórmula que considera la proporción o área relativa ocupada por el grupo en relación con todos los grupos presentes. Este proceso produce un índice numérico que captura la rareza de cada grupo, permitiendo la posterior comparación y priorización de los grupos en la cuenca.
11. **Definir y calcular el índice de conectividad:** Debido a que los impactos sobre los ecosistemas acuáticos son acumulativos, la metodología busca fomentar la conectividad en las microcuencas priorizadas debido a la importancia de la conectividad para los ecosistemas de agua dulce (Herrera-Pérez et al., 2019; Saura et al., 2017). Por lo tanto, en este paso, se construye un índice que refleja el grado de conexión entre dos microcuencas para priorizar corredores de microcuencas conectadas que unen ríos de cabecera (ver Paso 17). Este índice se basa en la proximidad entre microcuencas, medida desde sus centroides o a través de sus segmentos fluviales.
12. **Definir y calcular el índice de integridad (índice de sostenibilidad de cuencas):** La integridad desempeña un papel fundamental tanto en la priorización (véase el paso 17) como en la definición de las oportunidades de conservación (véase el paso 16). Ambos pasos requieren un único índice que va de 0 a 1, donde 0 representa una integridad baja y 1 una integridad alta. Por lo tanto, este paso implica la construcción de un índice de integridad que agrupe los índices definidos en el Paso 7 y calculados en el Paso 8. Esto se puede conseguir utilizando la agregación de índices de integridad a partir de métodos de agregación, como la agregación geométrica o aritmética (Juwana et al., 2012), o enfoques multiplicativos, como los utilizados por Thornbrugh et al. (2018).
13. **Definir y calcular el índice de importancia:** El concepto de importancia está estrechamente relacionado con la cantidad de valores de conservación presentes en una microcuenca. Como se describe en la sección de priorización (véase el paso 17), lo que se busca es maximizar la importancia al tiempo que se alcanza el objetivo de conservación. En esta fase, se construye un

índice numérico que va de 0 a 1, donde 0 denota la ausencia total de valores de conservación y 1 representa una alta concentración de valores de conservación. Un posible enfoque consiste en asignar un peso relativo (entre 0 y 1) a cada valor de conservación identificado en la etapa 4 y calcular una media ponderada de estos valores. De este modo se obtendría un índice que reflejaría la importancia global de los valores de conservación presentes en la microcuenca.

14. **Definir y calcular el índice de representatividad:** La representatividad se entiende como una medida de la presencia de grupos de agua dulce en la red de áreas protegidas existentes en la cuenca de análisis. El índice de representatividad se puede construir considerando la superficie del grupo de agua dulce y la superficie cubierta dentro de las áreas protegidas (Duarte et al., 2016). Si no hay áreas protegidas, este índice tendrá un valor de 0 para todas las microcuencas.
15. **Configurar los criterios de complementariedad:** La complementariedad se refiere a la inclusión en el portafolio de conservación de aquellos grupos de agua dulce que no están representados en las áreas protegidas. Este concepto está estrechamente relacionado con el de representatividad. Por lo tanto, se incorpora este criterio como una restricción en el proceso de priorización (véase el paso 2.17) para garantizar que el portafolio de conservación priorizado incluya las áreas protegidas existentes en el área de estudio. Si no existen áreas protegidas en el área de estudio, este criterio no se tiene en cuenta en la priorización.
16. **Definir las oportunidades de conservación:** Para este paso, la metodología utiliza la propuesta desarrollada por Riato et al. (2020) para definir las oportunidades de conservación, incluyendo protección, restauración y gestión sostenible, utilizando el índice de integridad estimado a nivel de microcuenca y subcuenca. El proceso comienza contrastando los índices en un diagrama de dispersión 2D (ambos índices deben escalarse entre 0 y 1, donde 0 representa baja integridad y 1 representa alta integridad). A continuación, se definen cuatro cuadrantes, centrados en el valor 0,5 de cada índice. Si tanto el índice de la microcuenca como el de la subcuenca muestran valores superiores a 0,5, el ecosistema se encuentra en buen estado; por lo tanto, sería mejor plantearse una acción de protección porque hacerlo requeriría una intervención mínima. Si, por el contrario, el índice a escala de subcuenca es superior a 0,5 pero el índice a escala de microcuenca es inferior a 0,5, sería más adecuado considerar la restauración como la mejor oportunidad de conservación porque una subcuenca sana puede soportar esta acción. Sin embargo, si ambos índices tienen valores inferiores a 0,5, la gestión sostenible sería la mejor opción. En este caso, la protección y la restauración requerirían un esfuerzo y unos recursos considerables porque no estarían respaldadas por unas buenas condiciones a ninguna de las dos escalas.
17. **Priorizar (optimización):** El objetivo de este paso es identificar la red de microcuencas que maximiza los valores de conservación (importancia) (I_{CV}) a la vez que i) promueve la mayor representatividad de grupos de agua dulce, ii) conecta el mayor número de grupos de agua dulce raros, iii) incluye microcuencas con alta integridad, y iv) genera corredores de microcuencas conectadas. Para ello, se toma como base la propuesta desarrollada por Hermoso et al. (2011) para formular la siguiente función objetivo de optimización (Of):

$$Of = \left(\sum_{UHA} I_{CV} \right) - \left(\alpha_{I_{WSI}} \sum_{\substack{\text{Integrity} \\ \text{penalty}}} I_{WSI} \right) + \left(\alpha_{I_R} \sum_{\substack{\text{Rarity} \\ \text{penalty}}} I_R \right) + \left(\alpha_{I_{Rep}} \sum_{\substack{\text{Representativity} \\ \text{penalty}}} I_{Rep} \right) - \left(\alpha_{I_C} \sum_{\substack{\text{Connectivity} \\ \text{penalty}}} I_C \right)$$

La metodología propone utilizar los índices de integridad (I), rareza (I_R), representatividad (I_{Rep}) y conectividad (CI) como penalizaciones (con pesos iguales) junto con una restricción que garantice la selección de microcuencas situadas dentro de áreas de conservación existentes.

Así, las microcuencas con menor integridad, mayor abundancia de un grupo de agua dulce y representación en áreas de conservación existentes serán penalizadas de forma más significativa.

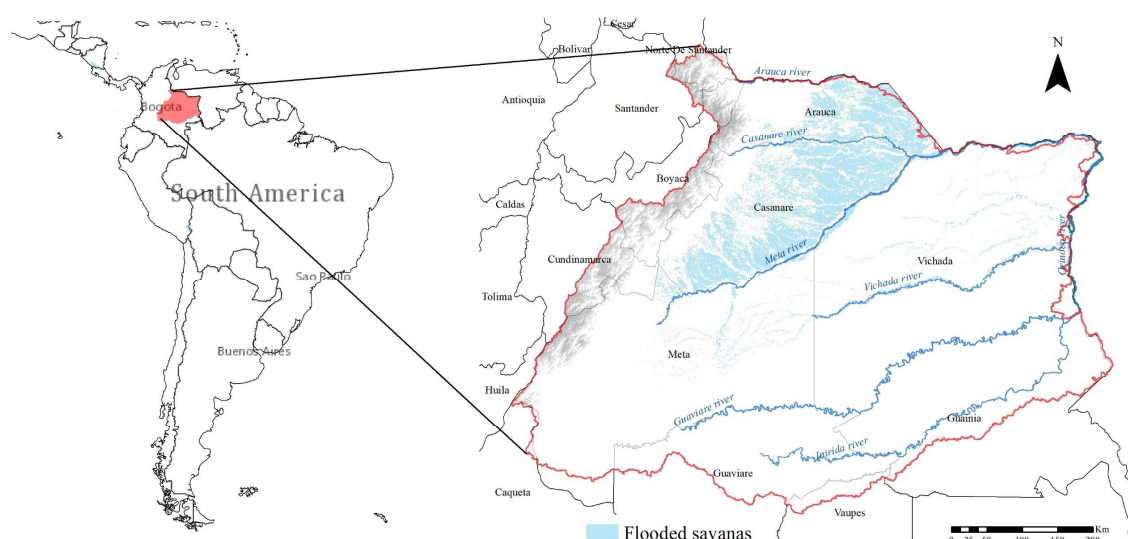
- 18. Portafolio priorizado:** Finalmente el portafolio de conservación para la cuenca de análisis está compuesto por las áreas prioritarias resultantes del proceso de optimización y las oportunidades de conservación identificadas a partir del diagrama de dispersión 2D propuesto por Riato et al. (2020), que deben ser abordadas para alcanzar los objetivos de conservación establecidos (ver paso 2).

En línea con lo anterior, en los capítulos posteriores se desglosa de manera detallada cada uno de los pasos que integra la metodológica propuesta por Nogales et al. (2023) para la generación del portafolio de conservación de la VRO.

3 Área de estudio

La VRO se sitúa en la parte oriental del país, abarca un 30.4% del territorio nacional con una extensión de 343,584 km² (ver **Figura 2**). Esta vasta región incluye los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta, y parcialmente a Boyacá, Cundinamarca, Santander, Norte de Santander, Guaviare, Guainía, Vaupés, Huila y Caquetá. La región se caracteriza por una gran diversidad de ecosistemas, desde ríos y lagunas hasta morichales y esteros.

Figura 2. Área de estudio VRO



Fuente: Nogales et al. (2023)

Presenta una diversidad notable con 36 tipos de ecosistemas terrestres entre los cuales destacan el bosque denso, bosque de galería y extensas sabanas tropicales (Brooke A. Williams et al., 2020). Esta diversidad ecológica convierte a la VRO en una región de alta biodiversidad albergando cerca de 15,400 especies de plantas, de las cuales el 35% son endémicas de la región; más de 5,000 especies de animales, entre ellos 650 especies de peces, y altas densidades de mamíferos como la danta y el jaguar (The Nature Conservancy, 2019). Además, contiene el 49% de los humedales y el 32.4 % de las reservas de agua dulce del territorio nacional (CONPES 3797, 2017; IDEAM, 2019).

Presenta un régimen de precipitación estacional de un solo pico (monomodal), con lluvias que oscilan entre 2,000 y 4,000 mm anuales, concentradas principalmente entre abril y noviembre. El periodo seco

se extiende de diciembre a marzo. Las temperaturas medias anuales varían entre 24°C y 28°C, con una variación térmica diaria moderada. Este clima tropical de sabana define el régimen hidrológico de los ríos de la región, como el Meta, Arauca, Vichada, Tomo, Tuparro y Guaviare, que muestran altos caudales durante la temporada de lluvias y una disminución significativa en la estación seca.

La cobertura de la tierra en la Orinoquia es diversa. Predominan los pastizales y áreas de sabana, que ocupan una gran parte del territorio. También existen importantes áreas de bosque denso y fragmentado, humedales, y zonas agrícolas y urbanas. Los cultivos de palma de aceite, arroz y maíz son prominentes, y la región experimenta una expansión significativa de la frontera agrícola y pecuaria, lo cual ha llevado a la transformación rápida de los ecosistemas naturales.

De otro lado, operan varias Corporaciones Autónomas Regionales (CARs), que juegan un papel crucial en la gestión ambiental y de los recursos naturales. Entre las CARs presentes se encuentran Corporinoquía, Cormacarena, Corpoguavio, Corpochivor, Corpoboyacá, Corponor, la CAR y la CDA (Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico). Estas corporaciones trabajan en la implementación de políticas de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales en sus respectivas áreas de influencia.

Actualmente, los ecosistemas de agua dulce de VRO enfrentan múltiples amenazas que comprometen su integridad ecológica. Una de las principales amenazas es la expansión de la frontera agrícola, impulsada por la ley ZIDRES, la cual ha determinado que aproximadamente el 70% del área de la VOC es apta para el desarrollo agrícola, enfocándose en la producción de palma de aceite, soya y actividades silvopastoriles (López-Ricaurte et al., 2017; Roa & Rodríguez, 2017). Además, la región sufre una deforestación significativa, concentrándose el 70% en los departamentos de Meta, Caquetá, Guaviare y Putumayo, debido a la ganadería extensiva, la construcción de infraestructuras viales y la extracción ilícita de minerales, lo que resulta en la pérdida de más de 200,000 hectáreas anualmente (Portocarrero Aya and Lee, 2021). La exploración y explotación de petróleo y gas también contribuyen a la degradación ambiental, especialmente en los departamentos de Meta y Casanare, afectando las condiciones naturales del suelo y los cuerpos de agua (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2023). La contaminación de fuentes hídricas constituye otro problema grave, principalmente debido a las actividades agrícolas, ganaderas y mineras, que liberan grandes cantidades de agroquímicos y metales pesados en los cuerpos de agua (Pinzón and Fajardo Gómez, 2018). A todo esto, se suma el cambio climático el cual amenaza con alterar el régimen hidrológico, provocando sequías extremas e inundaciones que afectan tanto a la biodiversidad como a las actividades productivas de la región (CORMACARENA et al., 2017).

4 Unidades de análisis espacial

Según Wetzel (2001) los ecosistemas de agua dulce son sistemas complejos que involucran una integración entre las especies bióticas, su crecimiento y adaptación, la productividad biológica asociada, el ciclo de nutrientes y los flujos de energía entre las comunidades microbianas, vegetales y animales acuáticas continentales y su entorno. Wetzel (2001) también señala que las cuencas hidrográficas son la unidad espacial apropiada para la planificación y gestión de la conservación de la biodiversidad de agua dulce y la conservación de los recursos hídricos, ya que agrupan estas características.

Varios autores, como Thieme et al. (2007), coinciden en que las cuencas hidrográficas son la unidad más lógica de planificación. Esta afirmación se ve respaldada por ejercicios de planificación llevados a cabo por Dorji et al. (2020); Hermoso et al. (2011); Linke and Hermoso (2022); Nogueira et al. (2023); Tognelli et al. (2019). En general, existe un acuerdo común sobre la importancia de las cuencas hidrográficas como unidad de planificación para la conservación de la biodiversidad y los recursos hídricos de los ecosistemas de agua dulce, por lo que para efectos de este estudio se considera como la unidad de planificación.

Tomando en cuenta que la metodología de Nogales et al. (2023) incorpora para la definición de las oportunidades de conservación el enfoque desarrollado por Riato et al. (2020), es necesario estimar el índice de integridad a nivel de microcuenca y subcuenca. Esto, debido a que Riato et al. (2020) propone contrastar la integridad en estos dos niveles, mediante un diagrama de dispersión 2D.

De esta forma, son dos los niveles de unidades de análisis que se definen para la generación del portafolio de la VRO. 1) microcuenca y 2) subcuenca. En ambos casos, se empleó el modelo de elevación digital de terreno (DEM) corregido, con una resolución de 90 m, procesado a través de la herramienta de ArcGIS 10.7, ArcHydro Tools. En los numerales posteriores, se detalla el proceso adelantado para la obtención de estas unidades.

4.1 Microcuencas

La delimitación de las microcuencas en la VRO considera dos criterios para la definición de los puntos de cierre:

- **Criterio Hidrológico:** a este criterio se asocian los puntos de intersección entre dos drenajes, que surgen a partir de un umbral de acumulación de área definido. A estos puntos se les denomina nodos hidrológicos.
- **Geomorfológico:** a este criterio corresponden los puntos de quiebre en los segmentos de un perfil largo de río, donde la pendiente es más pronunciada que los segmentos adyacentes. A estos puntos se les conoce como repliegues o hendiduras; en inglés-*knickpoints*.

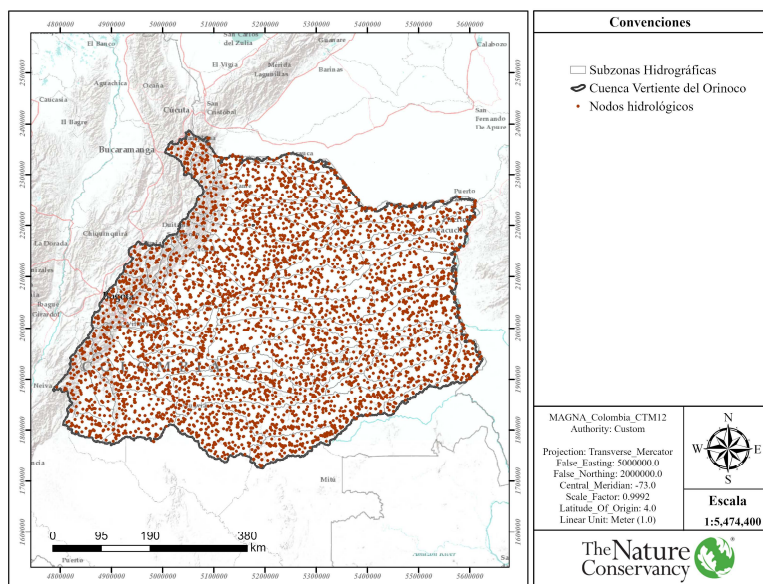
A nivel metodológico, los conjuntos de puntos resultantes de cada criterio se agrupan y se toman como los puntos de cierre de las microcuencas.

4.1.1 Identificación de Nodos Hidrológicos

Uno de los objetivos principales al diseñar un portafolio de conservación es garantizar su sincronización con la unidad de planificación que las autoridades utilizan para la elaboración de los instrumentos de planificación territorial. En este contexto, se procedió a analizar el tamaño de las microcuencas en consonancia con la segmentación utilizada por las corporaciones autónomas regionales con injerencia en la VRO (especialmente Cormacarena y Corporinoquia), para determinar el umbral de acumulación mínimo para la construcción de las UHA, sin aumentar de manera ostensible el número de unidades obtenidas.

Considerando un umbral de acumulación de 40.5 km², se crearon los nodos hidrológicos para abarcar toda la cuenca. La **Figura 3** muestra las ubicaciones de estos nodos, los cuales se obtuvieron siguiendo este criterio específico. Se lograron identificar un total de 4313 nodos bajo este enfoque.

Figura 3. Nodos hidrológicos de la VRO



4.1.2 Identificación de Knickpoints

La pendiente del río es un parámetro de suma importancia, ya que influye en los flujos de sedimentos y, en consecuencia, en la configuración geomorfológica tanto en planta como en perfil de un cauce (Beechie et al., 2006; Flores et al., 2006). Este factor tiene repercusiones significativas en la creación y dimensiones de hábitats para diversas especies. Por lo tanto, la identificación de cambios en la pendiente es crucial para tener una mayor segmentación de los grupos de agua dulce al interior de la VRO.

Los knickpoints se identificaron mediante los métodos descritos por Hayakawa and Oguchi (2006). Metodológicamente, se realiza el siguiente proceso:

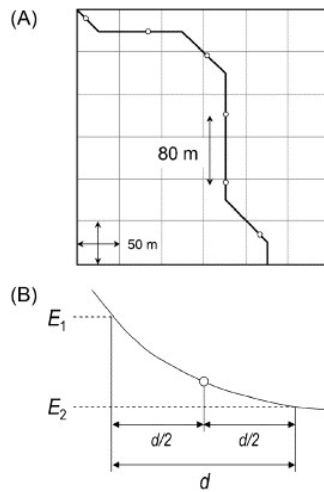
- Primero se toman las elevaciones de las celdas del modelo de elevación digital del terreno a lo largo del perfil longitudinal del río, los cuales han sido extraídos mediante el umbral de acumulación de área definido en el criterio hidrológico (Yunus et al., 2016).
- Luego se calculan los gradientes de los ríos con diferentes longitudes de medición d (las cuales varían de acuerdo con la longitud del tramo), a partir de la siguiente ecuación:

$$G_d = \frac{(E_1 - E_2)}{d}$$

Donde G_d es el gradiente de la corriente en m/m, en cada punto de medición. E_1 y E_2 son elevaciones obtenidas del DEM (m), aguas arriba y aguas abajo lejos del punto de medición, respectivamente.

Una presentación esquemática de este proceso se presenta en Figura 4. (A) es la vista en planta de los puntos de medición (círculo) a lo largo de la línea del río en un DEM de cuadrícula de 50 m. (B) es el perfil largo de la línea de corriente y la definición de la longitud de medición (d) para cada punto de medición. E_1 y E_2 son valores de elevación en $d/2$ puntos aguas arriba y aguas abajo, respectivamente (Hayakawa and Oguchi, 2006).

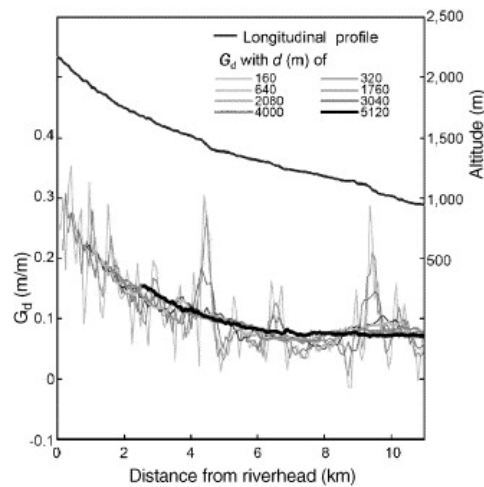
Figura 4. Cálculo del gradiente de la corriente



Fuente: Hayakawa and Oguchi (2006)

Un ejemplo de gradientes de corrientes para varios valores de d se muestra en la Figura 5.

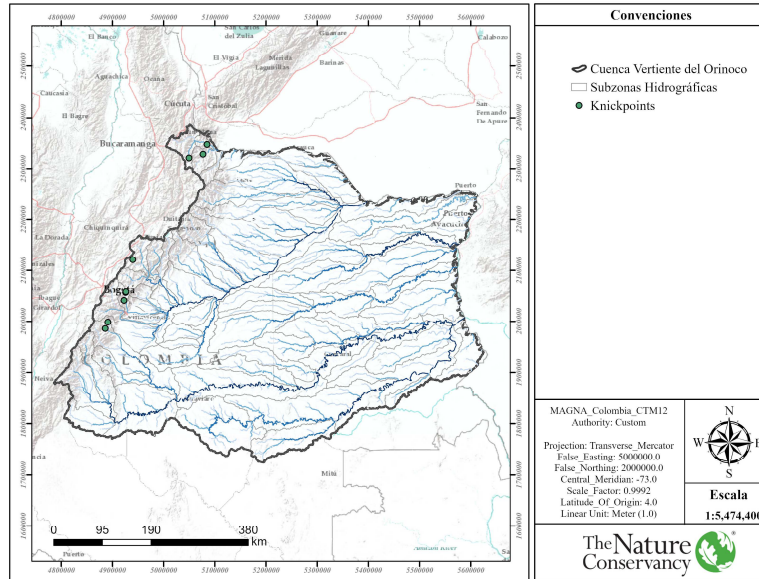
Figura 5. Ejemplo de gradientes de corrientes



G_d cambia en función de d y generalmente representa una característica local del gradiente del río cuando d es pequeño. Finalmente, todos los puntos que se encuentren por encima del umbral R_d se consideran como knickpoints.

En conjunto, se lograron identificar un total de 8 knickpoints en toda la VRO. Como se puede apreciar en la **Figura 6**, estos knickpoints tienden a concentrarse en la zona montañosa de la cuenca, específicamente en su parte alta. Esta distribución es coherente con las variaciones de elevación que caracterizan esta área.

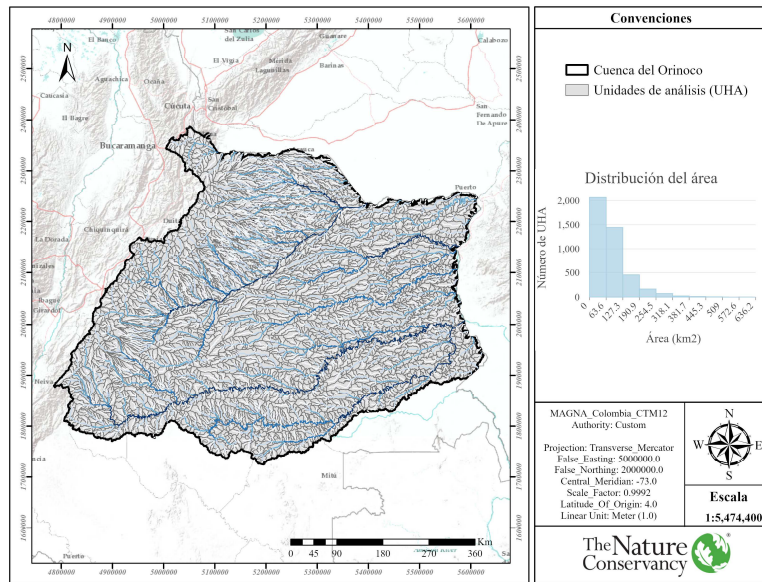
Figura 6. Knickpoints identificados en la VRO



4.1.3 Microcuencas

Al combinar los knickpoints con los nodos hidrológicos, se logró definir un total de 4243 microcuencas que abarcan toda la VRO. La representación de la segmentación de las microcuencas se muestra en la **Figura 7**. Considerando el gran número de microcuencas delimitadas, la **Figura 7** muestran las distribuciones correspondientes de las áreas de las UHA para toda la vertiente. Se observa que alrededor del 82% de las UHA delimitadas tiene valores de área menores a 127 km².

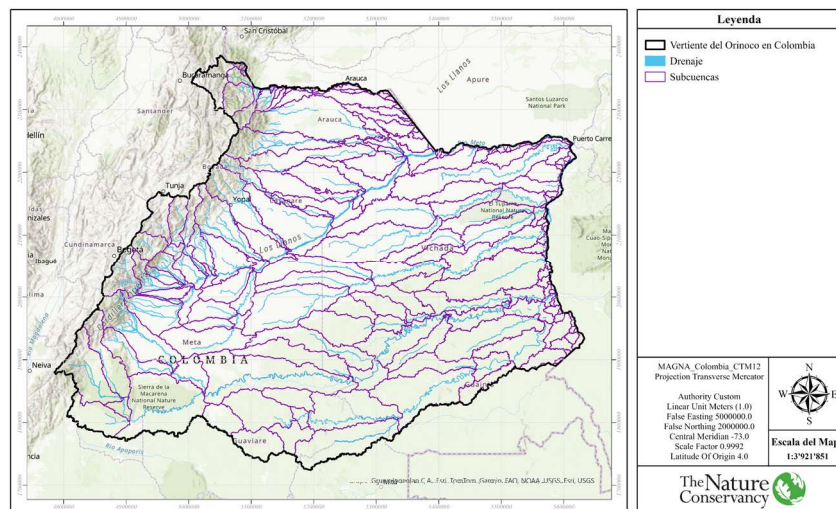
Figura 7. Microcuencas definidas para la cuenca de la VRO



4.2 Subcuencas

En el caso de las subcuencas, también se tomó en cuenta la segmentación utilizada por las corporaciones autónomas regionales, especialmente Cormacarena y Corporinoquia. Este análisis se enfocó en las cuencas de mayor extensión para la definición de las subcuencas. En total, se identificaron 158 subcuencas. Esta segmentación, tanto a nivel de microcuencas como de subcuencas, permitirá la integración del portafolio de conservación propuesto en este estudio con los instrumentos de planificación territorial. Se espera que esta integración mejore la efectividad de la gestión en un escenario de implementación.

Figura 8. Subcuencas definidas para la VRO



5 Valores de conservación

De acuerdo con Higgins et al. (2021) los valores de conservación se refieren a especies (de mamíferos, peces, aves, etc), servicios ecosistémicos, y, áreas culturales y espirituales que son importantes para una comunidad, los cuales merecen la pena ser conservados. Desde una perspectiva más general, cuando hablamos de valor de conservación, estamos haciendo alusión a la idea más general de priorizar un esfuerzo de conservación (Capmourteres and Anand, 2016).

Para para la VRO se consideraron los siguientes valores de conservación:

- Biológicos
 - ✓ Especies de anfibios, aves acuáticas, mamíferos acuáticos, peces y reptiles
 - ✓ Especies de megafauna de peces, reptiles, mamíferos acuáticos y anfibios
 - ✓ Especies en categoría de amenaza de anfibios, mamíferos acuáticos, peces, reptiles y aves acuáticas
 - ✓ Corredores migratorios de especies de peces.
 - ✓ Zonas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad
- Servicios ecosistémicos
 - ✓ Recreación y turismo
 - ✓ Especies de peces de uso ornamental
 - ✓ Especies de peces para consumo
- Áreas de valores culturales
 - ✓ Consejos Comunitarios
 - ✓ Reservas Campesinas
 - ✓ Resguardos Indígenas
 - ✓ Sitios arqueológicos
- Áreas de valor espiritual para las comunidades indígenas

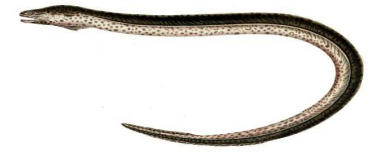
A continuación, se detallan cada uno de los valores de conservación considerado. La información de todos los valores de conservación puede ser consultada en el **Anexo 6**.

5.1 Biológicos

5.1.1 Especies de peces

Cerca del 46% de las 1,435 especies dulceacuícolas de toda Colombia están distribuidas en la Orinoquia y de ese total 56 especies son endémicas, posicionando a la Orinoquia como la segunda región con mayor riqueza de peces con un total de 658 especie (Lasso et al., 2010). De las especies que más se destacan que también son objeto de pesca esta Payara, Guabina, Sapoara (*Semaprochilodus laticeps*) y Pavón (*Cichla temencis*). La **Tabla 1** muestra algunas especies de peces más representativas para la VRO.

Tabla 1. Especies de peces presentes en la VRO

Especie	Imagen
Guabinas (<i>Hoplias malabaricus</i>)	
Anguila de río (<i>Synbranchus marmoratus</i>)	
Pavón (<i>Cichla temencis</i>).	

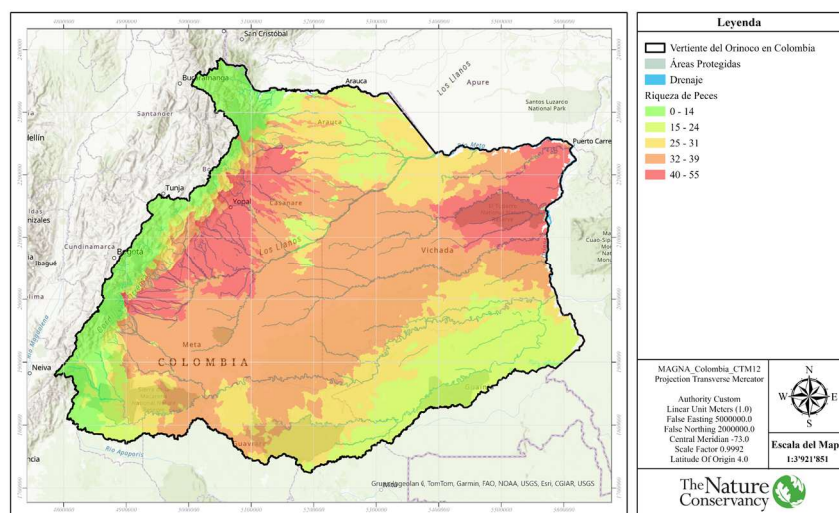
La lista de las especies que se consideraron como valores de conservación para las VRO se presenta en la **Tabla 2**. Los registros de presencia ausencia de cada una de las especies se tomaron de los BioModelos del Instituto Humboldt (Velásquez-Tibatá et al., 2019).

Tabla 2. Especies de peces consideradas como valores de conservación en la VRO

Peces				
Acestrorhynchus microlepis	Charax gibbosus	Hemigrammus micropterus	Moenkhausia dichroua	Pseudoplatystoma fasciatum
Aphyocharax alburnus	Chilodus punctatus	Hemigrammus newboldi	Moenkhausia intermedia	Pseudoplatystoma tigrinum
Apistogramma ortmanni	Colossoma macropomum	Hemiodus gracilis	Moenkhausia lepidura	Pygocentrus cariba
Arapaima gigas	Creagrutus bolivari	Hemiodus unimaculatus	Moenkhausia oligolepis	Rhamdia quelen
Astyanax bimaculatus	Crenicichla saxatilis	Hoplias malabaricus	Mylossoma duriventre	Satanoperca daemon
Astyanax fasciatus	Crenicichla wallacii	Hydrolycus scomberoides	Ochmacanthus alternus	Serrasalmus rhombeus
Astyanax integer	Ctenobrycon spilurus	Hypostomus pyrineusi	Odontostilbe pulchra	Sorubim lima
Astyanax maximus	Ctenopharyngodon idella	Iguanodectes spilurus	Oreochromis mossambicus	Steatogenys elegans
Biotodoma wavrini	Cyphocharax festivus	Leiarius marmoratus	Oreochromis niloticus	Steindachnerina guentheri
Bryconamericus alpha	Cyphocharax oenas	Leporinus friderici	Parodon apolinari	Sternopygus macrurus
Bryconamericus cismontanus	Dekeyseria scaphirhyncha	Leporinus muyscorum	Parodon buckleyi	Synbranchus marmoratus
Bryconops caudomaculatus	Dicrossus filamentosus	Limatulichthys griseus	Piaractus brachypomus	Tetragonopterus argenteus
Bryconops giacopinii	Eigenmannia virescens	Mesonauta insignis	Pimelodus blochii	Thoracocharax stellatus
Bujurquina mariae	Farlowella vittata	Microglanis poecilus	Pirirampus pirinampu	Zungaro zungaro
Carassius auratus	Gymnocorymbus thayeri	Microschemobrycon casiquiare	Plagioscion squamosissimus	
Characidium chupa	Gymnotus carapo	Moenkhausia copei	Poecilia sphenops	
Characidium steindachneri	Hemigrammus analis	Moenkhausia cotinho	Prochilodus nigricans	

En la **Figura 9** se presenta distribución riqueza de especies de peces consideradas como valor de conservación en la VRO a nivel de las unidades hidrológicas de análisis (UHA). De acuerdo con la distribución, los ríos del piedemonte de los departamentos del Meta y Casanare, en conjunto con el río Tomo y el río Bitá en el Vichada exhiben la mayor presencia de especies de peces.

Figura 9. Distribución riqueza de especies de peces consideradas como valor de conservación en la VRO



5.1.2 Especies de anfibios y reptiles

La VRO en cuanto a diversidad de herpetofauna es baja según se destaca en la investigación de Lasso et al. (2010), resaltando que las características climáticas, topográficas y la vegetación presente en la cuenca influyen en la presencia de anfibios y reptiles. Estas especies se destacan con mayor diversidad en tierras medias y altas con regímenes de alta humedad. Por el lado de los anfibios muestran asociaciones entre los hábitats y los modos reproductivos contrario a los reptiles que su distribución se establece más por la disponibilidad de alimentos y microhábitats específicos.

Las tierras altas y medias de las cordilleras andinas con un comportamiento climático que abarca dos picos de precipitación en el año produciendo así mayor humedad que por ende favorece la presencia de grupos de herpetofauna (Lasso et al., 2010). Estas zonas igualmente cuentan con 14% de anfibios y 7.2% de reptiles endémicos.

Lo que corresponde a la región de Inírida se reportan aproximadamente 27 especies de ranas, 31 especies de anfibios y 31 especies de reptiles, calculando para esta región una riqueza de herpetofauna que supera las 100 especies. La zona de los llanos registra un total de 121 especies de reptiles para los grupos saurios, tortugas y cocodrilos (Lasso et al., 2010). Así mismo, esta zona reporta amplia distribución de anfibios, especies de hílidos (ranas) y salamandras.

Para la zona del Guaviare y Vichada, son pocos los registros y carece de estudios sistematizados por lo que se registran muy pocas especies de anfibios y reptiles. En la **Tabla 3** se muestran ejemplares del grupo anfibios y reptiles presentes en la VRO.

Tabla 3. Especies de anfibios y reptiles presentes en la VRO

Especie	Imagen
Cocodrilo del Orinoco (<i>Crocodylus intermedius</i>)	
Ranas de Torrente (<i>Hyloscirtus denticulatus</i>)	

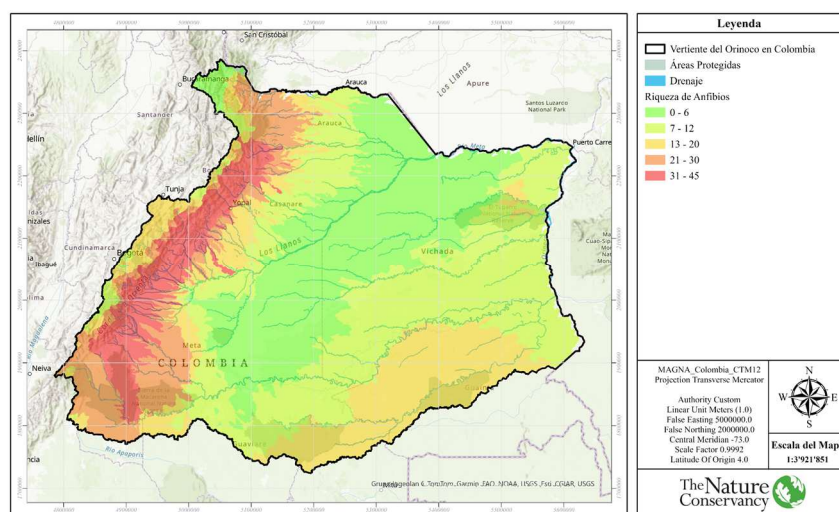
La lista de las especies de anfibios y reptiles que se consideraron como valores de conservación para las VRO se presenta en la **Tabla 4**. Los registros de presencia ausencia de cada una de las especies se tomaron de los BioModelos del Instituto Humboldt (Velásquez-Tibatá et al., 2019).

Tabla 4. Especies de anfibios y reptiles consideradas como valores de conservación en la VRO

Anfibios				
<i>Bolitoglossa adspersa</i>	<i>Gastrotheca nicefori</i>	<i>Leptodactylus fuscus</i>	<i>Pleurodema brachyops</i>	<i>Rhinella margaritifera</i>
<i>Centrolene buckleyi</i>	<i>Hoplobatrachus tigerinus</i>	<i>Leptodactylus hylaedactylus</i>	<i>Pristimantis bicolor</i>	<i>Rhinella marina</i>
<i>Colostethus fraterdanieli</i>	<i>Hyloscirtus bogotensis</i>	<i>Leptodactylus lineatus</i>	<i>Pristimantis bogotensis</i>	<i>Rhinella sternosignata</i>
<i>Dendropsophus columbianus</i>	<i>Hyloxalus subpunctatus</i>	<i>Leptodactylus mystaceus</i>	<i>Pristimantis frater</i>	<i>Scinax rostratus</i>
<i>Dendropsophus labialis</i>	<i>Hypsiboas boans</i>	<i>Leptodactylus pentadactylus</i>	<i>Pristimantis medemi</i>	<i>Scinax ruber</i>
<i>Dendropsophus mathiassoni</i>	<i>Hypsiboas crepitans</i>	<i>Leptodactylus wagneri</i>	<i>Pristimantis savagei</i>	<i>Scinax wandae</i>
<i>Dendropsophus microcephalus</i>	<i>Hypsiboas lanciformis</i>	<i>Lithobates palmipes</i>	<i>Pristimantis terraebolivaris</i>	<i>Trachycephalus venulosus</i>
<i>Dendropsophus minutus</i>	<i>Hypsiboas pugnax</i>	<i>Osteocephalus leprieurii</i>	<i>Pristimantis vilarsi</i>	
<i>Dendropsophus triangulum</i>	<i>Hypsiboas punctatus</i>	<i>Osteocephalus taurinus</i>	<i>Rhaebo glaberrimus</i>	
<i>Elachistocleis ovalis</i>	<i>Leptodactylus bolivianus</i>	<i>Phyllomedusa hypochondrialis</i>	<i>Rheobates palmatus</i>	
<i>Engystomops pustulosus</i>	<i>Leptodactylus colombiensis</i>	<i>Physalaemus fischeri</i>	<i>Rhinella granulosa</i>	
Reptiles				
<i>Caiman crocodilus</i>	<i>Helicops angulatus</i>	<i>Micrurus surinamensis</i>	<i>Paleosuchus trigonatus</i>	<i>Caiman crocodilus</i>
<i>Crocodylus intermedius</i>	<i>Lampropeltis triangulum</i>	<i>Paleosuchus palpebrosus</i>	<i>Potamites ecleopus</i>	<i>Crocodylus intermedius</i>

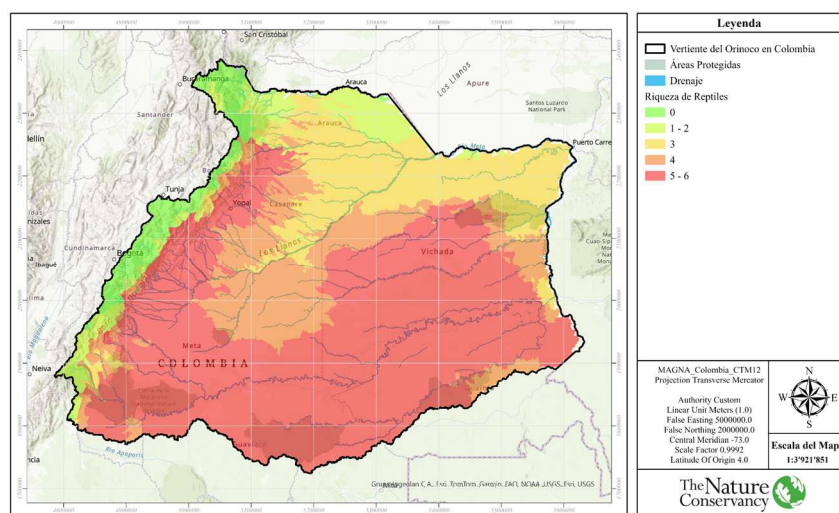
En la **Figura 10** se presenta distribución riqueza de especies de anfibios consideradas como valor de conservación en la VRO a nivel de las unidades hidrológicas de análisis (UHA). De acuerdo con la distribución, los ríos del piedemonte de los departamentos del Meta y Casanare exhiben la mayor presencia de especies de anfibios.

Figura 10. Distribución riqueza de especies de anfibios consideradas como valor de conservación en la VRO



En la **Figura 11** se presenta distribución riqueza de especies de reptiles consideradas como valor de conservación en la VRO a nivel de las unidades hidrológicas de análisis (UHA). A nivel general se logra observar que en la mayor parte de la VRO las densidades de reptiles están entre 3 y 6 especies. No obstante, la zona de la cordillera de los Andes presenta ausencia de reptiles, de acuerdo con los BioModelos considerados.

Figura 11. Distribución riqueza de especies de reptiles consideradas como valor de conservación en la VRO



5.1.3 Especies de aves acuáticas

La VRO debido a la variedad de sus paisajes, las condiciones biogeográficas y la dinámica de ocupación de territorio generan una amplia existencia de especies de aves que se pueden expresar en una ocurrencia de 1200 especies en zonas andinas y llanos (Lasso et al., 2010).

Los llanos inundables que cuentan con presencia de bosques de galería y ripario, arbustales de transición y morichales son de gran importancia en cuanto a disponibilidad de recursos y reproducción para las aves acuáticas, La Serranía de la Macarena, llanuras centrales y orientales cuentan con la menor riqueza de aves. Viendo identificado que las regiones con mayores variaciones estacionales y diferentes confluencias

biogeográficas se asocian a una mayor riqueza de aves. La **Tabla 5** evidencia algunos ejemplares de aves que se pueden encontrar en la VRO.

Tabla 5. Especies de aves presentes en la VRO

Especie	Imagen
Gavilán Caracolero (<i>Rosthramus sociabilis</i>)	
Chicuaco (<i>Cochlearius cochlearius</i>)	

La lista de las especies que se consideraron como valores de conservación para las VRO se presenta en la **Tabla 6**. Los registros de presencia ausencia de cada una de las especies se tomaron de los BioModelos del Instituto Humboldt (Velásquez-Tibatá et al., 2019).

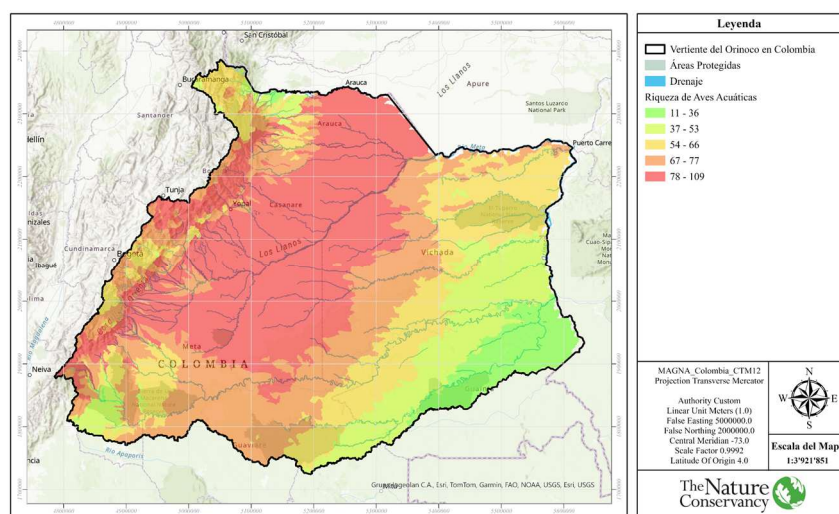
Tabla 6. Especies de aves acuáticas consideradas como valores de conservación en la VRO

Aves acuáticas				
Actitis macularius	Butorides virescens	Donacobius atricapilla	Merganetta armata	Porzana albicollis
Agamia agami	Cairina moschata	Egretta caerulea	Mesembrinibis cayennensis	Porzana carolina
Amaurolimnas concolor	Calidris bairdii	Egretta rufescens	Mycteria americana	Porzana flaviventer
Amazonetta brasiliensis	Calidris fuscicollis	Egretta thula	Neochen jubata	Pseudocolopteryx acutipennis
Anas cyanoptera	Calidris himantopus	Eudocimus albus	Neocrex erythrops	Rallus semiplumbeus
Anas discors	Calidris melanotos	Eudocimus ruber	Neocrex erythrops	Rostrhamus sociabilis
Anas flavirostris	Calidris minutilla	Eurypyga helias	Nomonyx dominicus	Rynchops niger
Anas georgica	Calidris pusilla	Fluvicola pica	Nyctanassa violacea	Sayornis nigricans
Anhima cornuta	Cercibis oxycerca	Fulica americana	Nycticorax nycticorax	Serpophaga cinerea
Anhinga anhinga	Certhiaxis cinnamomeus	Gallinago delicata	Ochthornis littoralis	Serpophaga hypoleuca
Anurolimnas castaneiceps	Charadrius collaris	Gallinago jamesoni	Opisthocomus hoazin	Sterna hirundo
Anurolimnas viridis	Charadrius semipalmatus	Gallinago nobilis	Oxyura jamaicensis	Syrigma sibilatrix
Aramides cajaneus	Charadrius vociferus	Gallinago paraguaiae	Pandion haliaetus	Tachybaptus dominicus
Aramus guarauna	Chloroceryle aenea	Gallinago undulata	Pardirallus maculatus	Tachycineta albiventer
Ardea alba	Chloroceryle amazona	Gallinula melanops	Paroaria gularis	Theristicus caudatus
Ardea cocoi	Chloroceryle americana	Heliornis fulica	Phaeothlypis fulvicauda	Tigrisoma fasciatum
Ardea herodias	Chloroceryle inda	Himantopus mexicanus	Phaetusa simplex	Tigrisoma lineatum
Arundinicola leucocephala	Chrysomus icterocephalus	Inezia subflava	Phalacrocorax brasilianus	Tringa flavipes
Atticora fasciata	Ciconia maguari	Ixobrychus exilis	Phimosus infuscatus	Tringa melanoleuca
Aythya affinis	Cinclus leucocephalus	Jabiru Mycteria	Pilherodius pileatus	Tringa solitaria
Bartramia longicauda	Circus buffoni	Jacana jacana	Pitangus lictor	Vanellus cayanus
Botaurus pinnatus	Cistothorus apolinari	Laterallus albigularis	Platalea ajaja	Vanellus chilensis

Aves acuáticas				
Burhinus bistriatus	Cistothorus platensis	Laterallus exilis	Plegadis falcinellus	Zebrilus undulatus
Busarellus nigricollis	Cochlearius cochlearius	Laterallus melanophaius	Pluvialis dominica	
Buteogallus anthracinus	Dendrocygna autumnalis	Limnodromus griseus	Podilymbus podiceps	
Buteogallus urubitinga	Dendrocygna bicolor	Megaceryle alcyon	Porphyrio flavirostris	
Butorides striata	Dendrocygna viduata	Megaceryle torquata	Porphyrio martinica	

En la **Figura 15** se presenta distribución riqueza de especies de aves acuáticas consideradas como valor de conservación en la VRO a nivel de las unidades hidrológicas de análisis (UHA). Se logra observar que las mayores riquezas están sobre las áreas de humedales y planicies inundables en los departamentos de Meta, Casanare y Arauca.

Figura 12. Distribución riqueza de especies de aves acuáticas consideradas como valor de conservación en la VRO



5.1.4 Especies de mamíferos acuáticos

En la región de los llanos por los aspectos de hábitat, genética, ecología se pueden determinar un grupo de especies de mamíferos acuáticos representativos como los delfines (*Inia geoffrensis*), manatí antillano (*Trichechus manatus*) y nutria gigante (*Pteronura brasiliensis*). Las especies de delfines *Inia geoffrensis* y *Sotalia Fluviatilis* junto con los manatíes se consideran especies migratorias ya que realizan movimientos dentro de sus ciclos de vida a lo largo del Orinoco y sus afluentes de forma transfronteriza entre Colombia y Venezuela (Lasso et al., 2010). La **Tabla 7** evidencia algunos ejemplares de mamíferos que se pueden encontrar en la VRO.

Tabla 7. Especies de mamíferos presentes en la VRO

Especie	Imagen
Delfín de río (<i>Inia geoffrensis</i>)	
Nutria Gigante (<i>Pteronura brasiliensis</i>)	

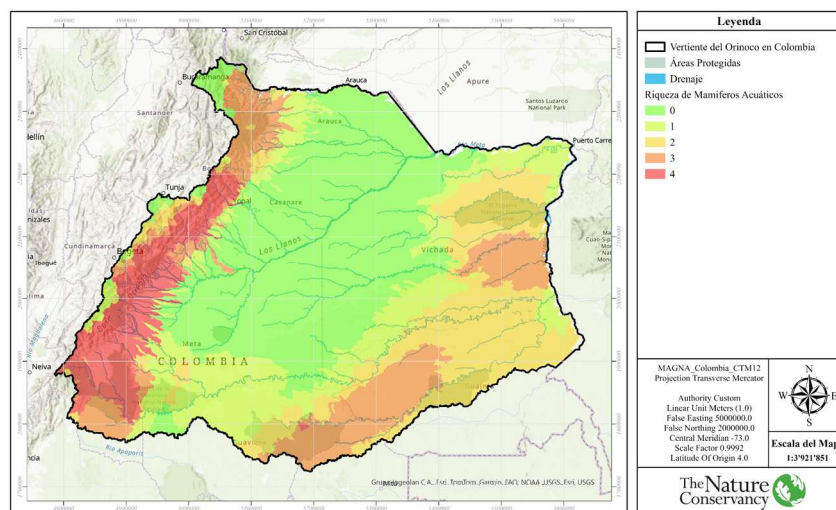
La lista de las especies que se consideraron como valores de conservación para las VRO se presenta en la **Tabla 8**. Los registros de presencia ausencia de cada una de las especies se tomaron de los BioModelos del Instituto Humboldt (Velásquez-Tibatá et al., 2019).

Tabla 8. Especies de mamíferos consideradas como valores de conservación

Mamíferos				
Chironectes minimus	Inia geoffrensis	Lontra longicaudis	Nectomys squamipes	Tapirus terrestris

En la **Figura 15** se presenta distribución riqueza de especies de mamíferos acuáticos consideradas como valor de conservación en la VRO a nivel de las unidades hidrológicas de análisis (UHA). De acuerdo con la distribución, los ríos del piedemonte de los departamentos del Meta y Casanare exhiben la mayor presencia de especies de mamíferos.

Figura 13. Distribución riqueza de especies de mamíferos acuáticos consideradas como valor de conservación en la VRO



5.1.5 Especies en categoría de amenaza

La pérdida de especies es un suceso natural hasta cierto punto, que se produce cuando los factores ambientales o problemas evolutivos provocan la desaparición de una especie. Los cambios en los hábitats y malas tendencias reproductivas son factores que pueden lograr que la tasa de mortalidad de una especie sea superior a su tasa de natalidad. Sin embargo, las actividades antrópicas han llegado a provocar la

desaparición de especies mediante caza, sobreexplotación, especies invasoras en los ecosistemas, cambio de usos del suelo, incluso el rápido crecimiento de la población humana (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2021).

Durante los últimos cincuenta años las poblaciones de mamíferos, aves, peces, reptiles y anfibios han disminuido en 68% en promedio, en América Latina es un 94%. Así mismo la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) indica que 5200 especies de animales se encuentran en peligro de extinción siendo para aves un 11%, 25% anfibios y mamíferos, 20% reptiles y 34% peces (WWF, 2020).

En el caso de Colombia, la pérdida de biodiversidad especialmente de ecosistemas de agua dulce se puede ver influenciada por deterioro y pérdida de hábitat causada por el desarrollo humano, como lo son actividades agrícolas, construcción de hidroeléctricas, pesca incidental, caza ilegal, minería ilegal entre otras.

Según el informe de Planeta Vivo 2020 (WWF, 2020), los grupos en los que se clasifican las especies de agua dulce son más vulnerables en comparación con las especies terrestres, una de cada tres especies de agua dulce está amenazada de extinción. Sin embargo, la pérdida de megafauna siendo las especies de gran tamaño que pertenecen a los ecosistemas de agua dulce como los delfines o bagres migratorios es de gran relevancia debido a que mantienen el equilibrio del ecosistema, su pérdida puede deberse a su sensibilidad a los cambios de hábitats y a sus dinámicas de reproducción. Por ejemplo, el avistamiento de delfines en los ríos Meta y Amazonas ha disminuido un 4%.

Para la identificación de especies amenazadas, se cuenta con la Lista Roja de UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), esta es un indicador crítico de la salud de la biodiversidad a nivel global. Esta lista provee información sobre el tamaño poblacional, distribución, hábitat, amenazas, uso etc. Esta información se presenta con categorías para clasificar las especies a alto riesgo de extinción. Estas categorías son: No evaluado, Datos insuficientes, Preocupación Menor, Casi Amenazado, Vulnerable, En Peligro, En Peligro Crítico, Extinto en estado Silvestre y Extinto (ver **Figura 14** y **Tabla 9**).

Figura 14. Categorías de amenaza de acuerdo con la Lista Roja de UICN

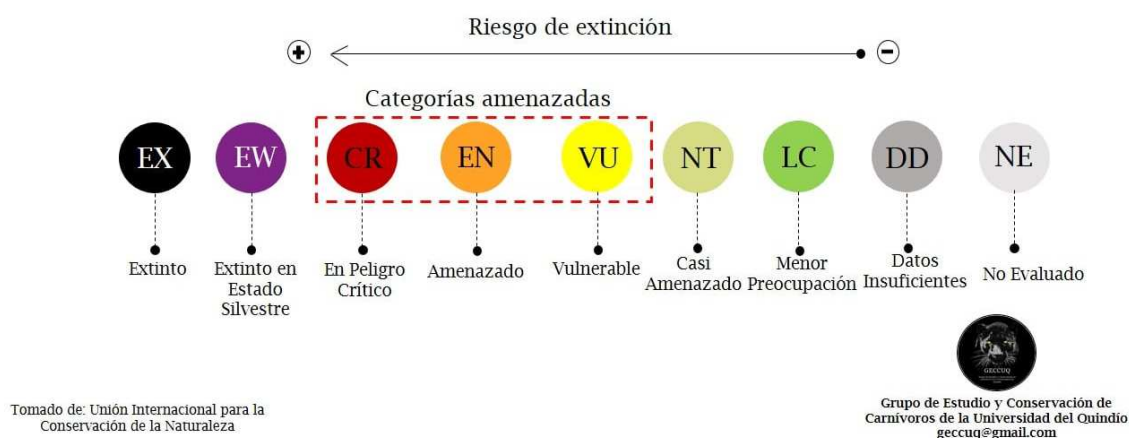


Tabla 9. Categorías de la lista roja de especies amenazadas de la UICN

Categoría	Descripción
No evaluado (NE)	Taxón no evaluado aun según criterios.
Datos insuficientes (DD)	Esta categoría se presenta cuando no hay información para realizar una evaluación del riesgo de extinción de la especie basándose en la distribución o condición de la población.
Preocupación Menor (LC)	Se considera esta categoría cuando el taxón no cumple ningún criterio que definen las categorías (EN, VU, NT)

Casi Amenazado (NT)	Cuando se evalúa un taxón y no satisface los criterios para En peligro crítico, En peligro o Vulnerable, pero está próximo a cumplirlos.
Vulnerable (VU)	Cumple con cualquier criterio de "A" a "E", donde entran población y tamaño de esta, individuos maduros, fragmentación, extensión de presencia por lo cual se considera que se está enfrentando a un riesgo de extinción alto en estado de vida silvestre.
En Peligro (EN)	Se considera que se está enfrentando un riesgo de extinción muy alto en estado de vida silvestre cuando cumple con los criterios "A" a "E" específicos para En Peligro.
En Peligro Crítico (CR)	De acuerdo con esta categoría se explican los criterios para determinación de En peligro Crítico que indica que se está enfrentando a un riesgo de extinción extremadamente alto.
Extinto en estado Silvestre (EW)	Se considera cuando un taxón sobrevive en cautividad o como población naturalizada fuera de su distribución original.
Extinto (EX)	Se considera Extinto cuando no queda duda razonable de que el último individuo existente ha muerto.

Fuente: UICN (2012)

En la **Tabla 10** presenta algunas especies emblemáticas de la cuenca que se reportan en condición de amenaza.

Tabla 10. Especies que presentan condición de amenaza según la lista roja de la UICN

Especie	Grupo	Categoría	Descripción	Imagen
Pseudoplatystoma orinocoense (Bagre rayado)	Peces	En peligro (EN)	Su distribución geográfica se da en el Orinoco (Arauca, Meta, Vichada, Inírida, Guaviare), la mayor amenaza para esta especie es la degradación ambiental.	
Brachyplatystoma rousseauxii (Dorado)	Peces	Vulnerable (VU)	Su distribución geográfica se da en el Orinoco (Arauca, Guayabero, Meta, Guaviare). Sus amenazas radican en la sobrepesca y la deforestación en las cabeceras de los ríos y áreas ribereñas.	
Crocodylus intermedius (Cocodrilo del Orinoco)	Reptiles	En Peligro Crítico (CR)	Puede encontrarse en el río Arauca, Bitá, Guaviare, Guayabero, Meta, Vichada, Orinoco y Casanare. Su principal amenaza es fragmentación de hábitat, contaminación y consumo.	
Cistothorus apolinari (Cucarachero o Chirriador)	Aves	En Peligro (EM)	Endémico de la cordillera oriental de los Andes. Se encuentran en orillas de lagunas, humedales, praderas inundables. Sus amenazas son modificaciones del ecosistema, actividades agrícolas entre otros.	

Fuente: Mojica et al. (2012); UICN, (2012)

Tomando en cuenta que VRO es una de las principales regiones con mayor proporción de especies en riesgo de extinción (Zamudio and Maldonado-Ocampo, 2022), estas se consideran como un valor de conservación. Para esto, se realiza el análisis de las especies (peces, aves, mamíferos, anfibios y reptiles) de agua dulce, que se categorizan como especies amenazadas. Para su identificación, se recurre a la Lista Roja de la UICN, la información esta generada de manera espacial con el fin de entender la distribución de las especies. Con este material, se filtran las especies para la VRO e igualmente se tiene en cuenta que pertenezcan a ecosistemas de agua dulce. La UICN dentro de las categorías establecidas, indica que las categorías para determinar la amenaza de una especie son En Peligro Crítico (CR), En peligro (EN) y Vulnerable (VU), con esto se puede contabilizar las especies que se consideran en Amenaza y como están distribuidas en las microcuencas ya delimitadas en la VRO.

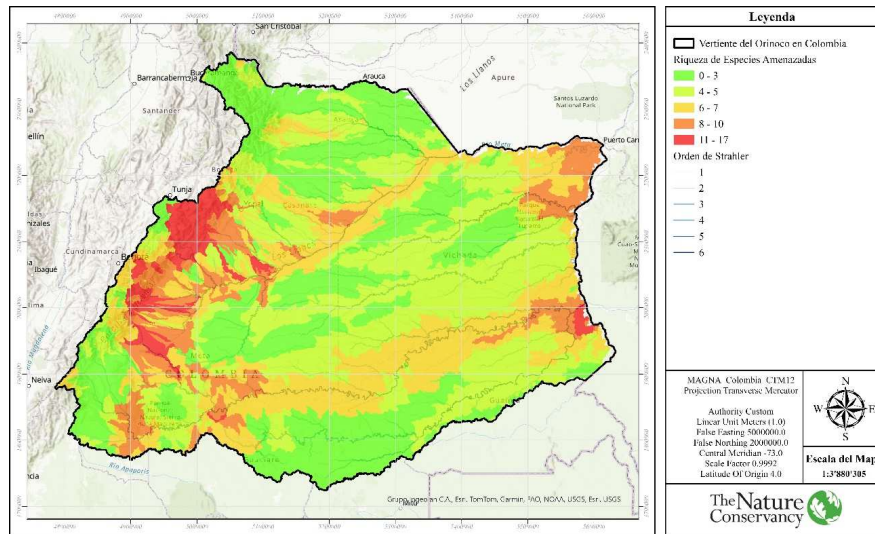
Con la información obtenida de la lista roja de la IUCN, se determina el número de especies por grupo englobando peces, mamíferos, aves, anfibios y reptiles con su categoría de clasificación como especies amenazadas que se encuentran en ecosistemas de agua dulce específicamente en la VRO. La **Tabla 11** consolida las especies en categoría de amenaza que son consideradas como valor de conservación.

Tabla 11. Listado de especies amenazadas por grupos y su categoría que se consideran como valor de conservación

Nombre	Categoría	Grupo	Nombre	Categoría	Grupo
Allobates juanii	EN	Anfibios	Brycon moorei	VU	Peces
Allobates ranoides	CR	Anfibios	Bryconamericus tolimae	VU	Peces
Atelopus lozanoi	EN	Anfibios	Chaetostoma dorsale	VU	Peces
Atelopus marinkellei	EN	Anfibios	Chaetostoma formosae	VU	Peces
Atelopus minutulus	CR	Anfibios	Chaetostoma joropo	VU	Peces
Atelopus muisca	CR	Anfibios	Chrysobrycon guahibo	VU	Peces
Atelopus pedimarmoratus	CR	Anfibios	Corydoras axelrodi	VU	Peces
Atelopus petriruizi	CR	Anfibios	Corydoras loxozonus	VU	Peces
Atelopus tamaense	CR	Anfibios	Corydoras metae	VU	Peces
Centrolene buckleyi	CR	Anfibios	Corydoras simulatus	VU	Peces
Centrolene geckoidea	CR	Anfibios	Creagrutus atratus	VU	Peces
Centrolene medemi	EN	Anfibios	Dicrossus gladicauda	EN	Peces
Centrolene petrophilum	EN	Anfibios	Dolichancistrus cobrensis	EN	Peces
Hyalinobatrachium esmeralda	EN	Anfibios	Farlowella acus	VU	Peces
Hyloscirtus denticulatus	VU	Anfibios	Farlowella colombiensis	VU	Peces
Hyloscirtus lynchi	CR	Anfibios	Farlowella mitoupibo	VU	Peces
Hyloscirtus platydactylus	VU	Anfibios	Gymnotus ardilai	EN	Peces
Hyloxalus cepedai	VU	Anfibios	Hyphessobrycon hildae	VU	Peces
Hyloxalus edwardsi	CR	Anfibios	Parodon suborbitalis	VU	Peces
Hyloxalus picachos	EN	Anfibios	Pimelodella linami	VU	Peces
Pristimantis carrangerorum	EN	Anfibios	Pimelodus garciabarrigai	VU	Peces
Pristimantis corniger	EN	Anfibios	Pristobrycon careospinus	EN	Peces
Inia geoffrensis	EN	Mamíferos	Renova oscari	VU	Peces
Neusticomys venezuelae	VU	Mamíferos	Rhizosomichthys totae	CR	Peces
Pteronura brasiliensis	EN	Mamíferos	Rineloricaria jurupari	EN	Peces
Tapirus pinchaque	EN	Mamíferos	Trichomycterus venulosus	CR	Peces
Tapirus terrestris	VU	Mamíferos	Tyttocharax metae	VU	Peces
Apistogramma iniridae	VU	Peces	Brachyplatystoma rousseauxii	VU	Peces
Apistogramma lineata	EN	Peces	Pseudoplatystoma metaense	EN	Peces
Apistogramma psammophila	EN	Peces	Pseudoplatystoma orinocoense	EN	Peces
Apistogramma velifera	VU	Peces	Crocodylus intermedius	CR	Reptiles
Astroblepus latidens	VU	Peces	Cistothorus apolinari	EN	Aves
Astroblepus mariae	EN	Peces			

En la **Figura 15** se presenta la riqueza de las especies amenazadas en la VRO a nivel de las unidades hidrológicas de análisis (UHA). De acuerdo con la distribución, los departamentos del Meta, Guaviare y Vichada exhiben la mayor presencia de especies amenazadas, dada la presión antrópica en los ecosistemas por la expansión de la frontera agrícola y otros factores como la deforestación.

Figura 15. Distribución riqueza de especies amenazadas en la VRO



5.1.6 Especies de megafauna

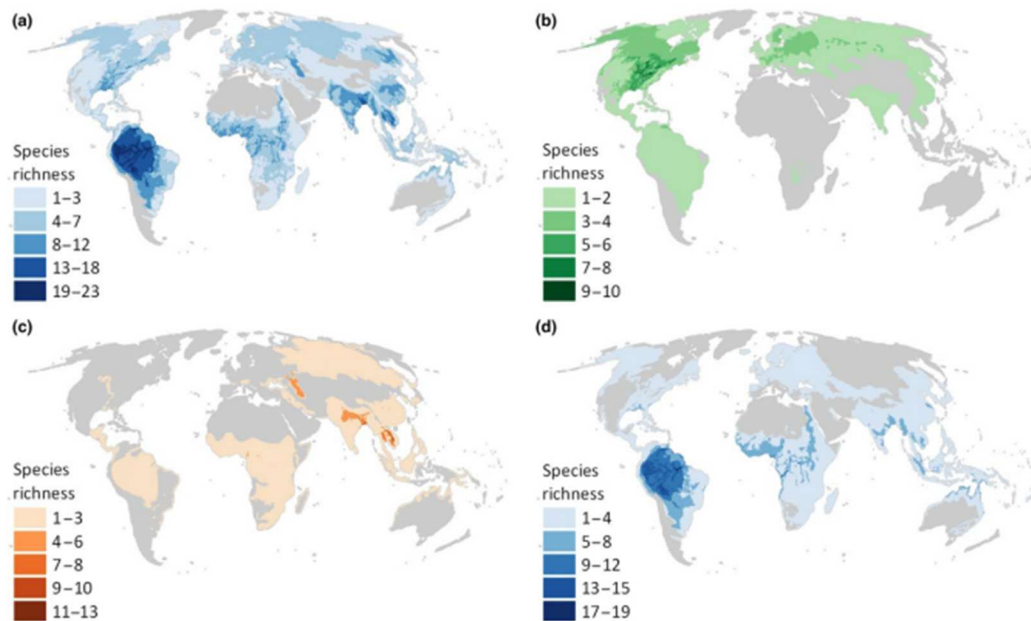
La megafauna está definida como peces, anfibios, mamíferos y reptiles acuáticos que tienen un peso superior a los 30 kilogramos. El tamaño de estas especies hace que sean más sensibles a cambios en sus hábitats y asimismo requieren amplios espacios que estén conservados para su supervivencia. Así mismo, son esenciales para el control de poblaciones de otras especies para el mantenimiento del equilibrio en el ecosistema. Es por esta razón que son consideradas como importantes valores de conservación en la VRO.

Particularmente, las especies de megafauna de agua dulce se ven afectadas particularmente por extracción de agua, degradación del hábitat que resultan del desarrollo de urbanización, expansión de la frontera agrícola, aumento acelerado de la población humana entre otros (He et al., 2018).

Dentro de las especies de megafauna que habitan la VRO, está el delfín rosado (*Innia geoffrensis*), esta especie se clasifica como Vulnerable (VU) según el libro rojo de mamíferos en Colombia, esto debido a la reducción de su población en Colombia por la pesca incidental y contaminación de su hábitat. Otra especie relevante dentro de esta clasificación está el Caimán del Orinoco (*Crocodylus intermedius*) es una especie endémica del Orinoco, y tiene una categoría de En Peligro Crítico (EN) en la Lista roja de la IUCN, sus amenazas latentes son la caza, consumo de sus huevos, fragmentación de su hábitat y la contaminación del río.

Las especies de megafauna de agua dulce que se consideraron como valores de conservación corresponden a las reportadas por He et al. (2018). Este autor consideró 130 especies de peces, 44 reptiles, 31 mamíferos y 2 anfibios. La **Figura 16** muestra los resultados para el análisis llevado a cabo por a escala global, entendiendo que la imagen corresponde a riqueza de especies de megafauna de agua dulce, el mapa (a) corresponde a riqueza global, (b) con población creciente o estable, (c) en declive y (d) desconocida.

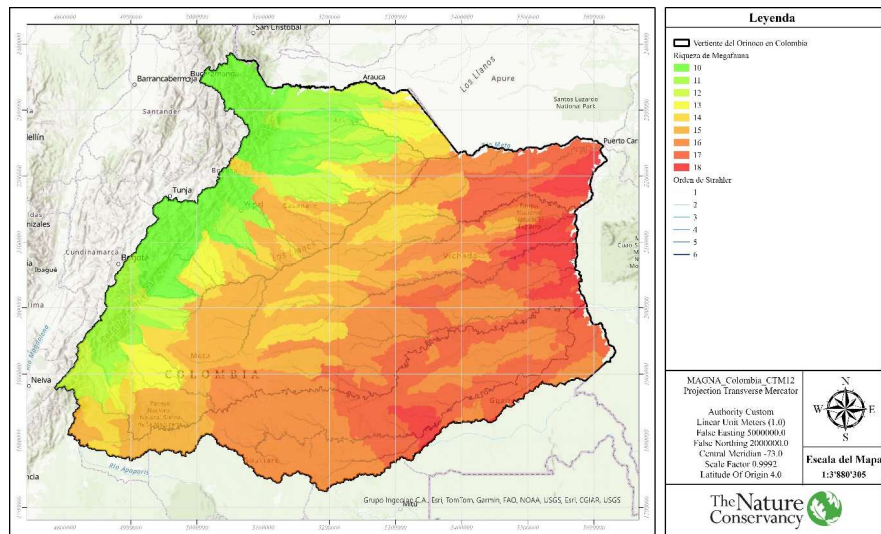
Figura 16. Riqueza megafauna aguadulce a escala global



Fuente: He et al. (2018)

Teniendo en cuenta las unidades hidrológicas de análisis (UHA), se realizó una estadística zonal con las cuencas definidas por He et al. (2018) y se estimó la cantidad de área en cada una de las microcuencas o unidades para finalmente asignar la riqueza del polígono que tuviera la mayor participación en cada microcuenca.

Figura 17. Distribución riqueza de megafauna para la cuenca del río Orinoco



La **Figura 17** evidencia espacialmente como se distribuye la riqueza de especies de megafauna para la cuenca del río Orinoco, en escala de color de verde que indica categoría menor categoría de riqueza a rojo que indica alta riqueza de megafauna. Con este resultado se puede determinar que la mayor riqueza se encuentra en la zona oriental de cuenca, por el río Orinoco, Bitá, Inírida y Vichada. Contrario a esto, las zonas con riqueza más escasa de megafauna, se encuentra por la región de la cordillera, región andina,

esta falta de diversidad puede atribuirse a condiciones ambientales menos propicias para estas especies, como altitud, clima y disponibilidad de recursos, además la fragmentación del hábitat y la presión humana pueden contribuir a la reducción de estas especies.

5.1.7 Corredores migratorios

La mayoría de los animales llevan a cabo regularmente movimientos de distinta magnitud como parte de sus actividades diarias. La búsqueda de alimento necesariamente lleva a los individuos de una especie de un lugar a otro, y lo mismo sucede con la búsqueda de parejas sexuales, refugios temporales o permanentes, o para escapar de los depredadores. La mayoría de estos desplazamientos se inician en respuesta a un estímulo ambiental y cesan en cuanto dicho estímulo deja de presentarse. El movimiento de un lugar a otro permite el ajuste permanente a las condiciones cambiantes del entorno, mientras estas no sean superiores a los límites de tolerancia de la especie en cuestión, y por esa razón los movimientos diarios de muchos animales tienen lugar dentro de un solo hábitat. Por el contrario, hay movimientos periódicos de muchas especies animales que les permiten ajustarse a la heterogeneidad espacial y temporal del ambiente, no como una respuesta inmediata y oportunista, sino como un fenómeno adaptativo con causas próximas, condicionantes ecológicas, medios y amplitudes igualmente diversos (Zapata and Usma, 2013).

Entender estos patrones de movimiento, especialmente los corredores migratorios de especies de peces de agua dulce, es fundamental. Estos peces no solo son una fuente crucial de alimento para comunidades humanas y poseen un valor pesquero significativo, sino que también desempeñan funciones ecológicas esenciales. Su migración y movimiento contribuyen al equilibrio y salud de los ecosistemas acuáticos. De aquí la su inclusión como valor de conservación.

El Incode-WWF (2004) realizó un primer esfuerzo de cartografiar las rutas migratorias de 11 especies comerciales de la cuenca del Orinoco, trabajo que posteriormente fue ampliado por Zapata and Usma (2013) a través de la Guía de las especies Migratorias de la Biodiversidad en Colombia. Peces. De acuerdo con Zapata and Usma (2013), son 106 las especies de peces (de los órdenes *Characiformes*, *Clupeiformes* y *Siluriformes*) que realizan procesos migratorios y que se conoce el tipo de migración que realizan. En la **Tabla 12** se presentan los tipos de migración para las 106 especies de peces dulceacuícolas con migración en Colombia.

Tabla 12. Tipo de migración para las 106 especies de peces dulceacuícolas con migración en Colombia

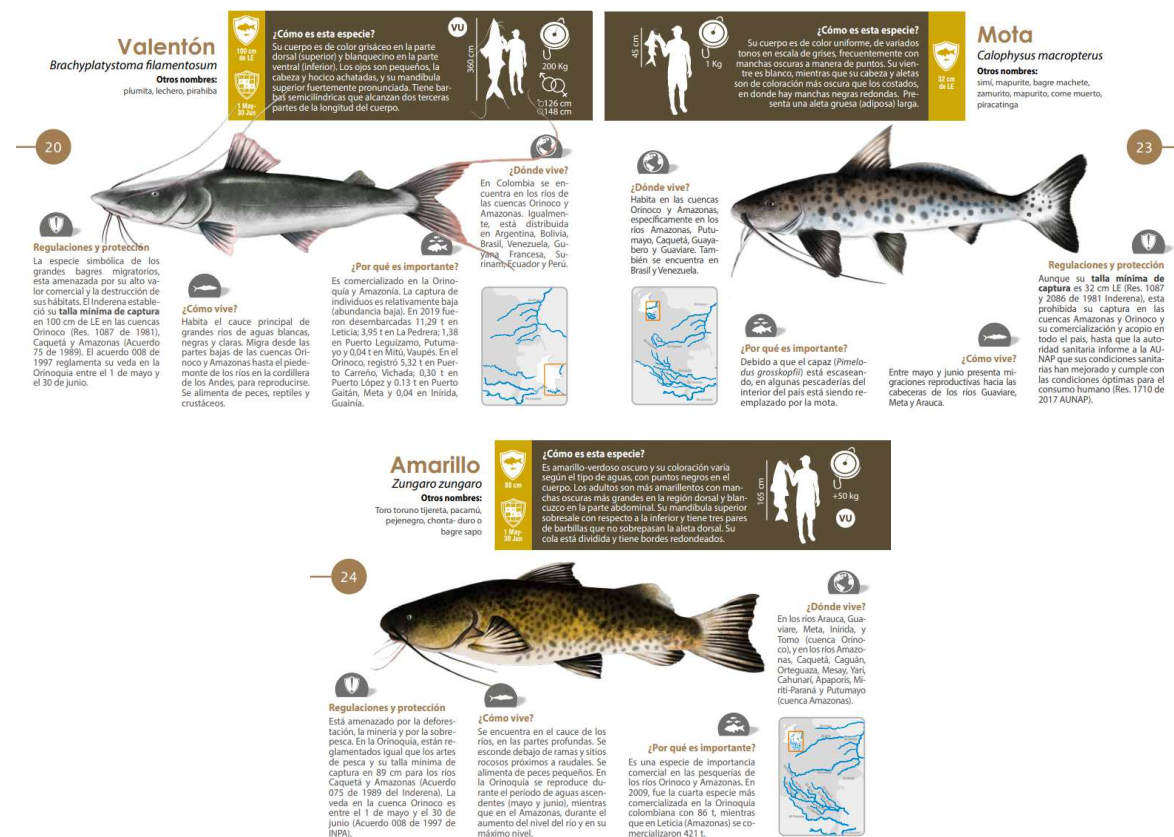
Especie	Orden	Estatus de residencia		Tipo de migración							Especie	Orden	Estatus de residencia		Tipo de migración						
		RNI	DES	LOC	LON	MC	MM	MG	NC	TRF			RNI	DES	LOC	LON	MC	MM	MG	NC	TRF
Pellona castelnaeana	Clupeiformes	0	x	0	0	0	x	0	0	0	Hydrolycus tatauaia	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Pellona flavipinnis	Clupeiformes	0	x	0	0	0	x	0	0	0	Hydrolycus wallacei	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Laemolyta garmani	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Raphiodon vulpinus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Leporinus agassizii	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Anodus orinocensis	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Leporinus fasciatus	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Hemiodus gracilis	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Leporinus friderici	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Hemiodus immaculatus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Leporinus muyscorum	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Saccodon dariensis	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Schizodon fasciatus	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Prochilodus magdalenae	Characiformes	x	0	x	x	0	x	0	0	0
Astyanax abramis	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Prochilodus mariae	Characiformes	x	0	x	x	0	x	0	0	0
Astyanax symmetricus	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Prochilodus nigricans	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Brycon amazonicus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Prochilodus reticulatus	Characiformes	x	0	x	x	0	x	0	0	0
Brycon cephalus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Prochilodus rubrotaeniatus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Brycon falcatus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Semaprochilodus insignis	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Brycon melanopterus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Semaprochilodus kneri	Characiformes	x	0	x	x	0	x	0	0	0
Brycon moorei	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Semaprochilodus laticeps	Characiformes	x	0	x	x	0	x	0	0	0
Brycon sinuensis	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Semaprochilodus taenirius	Characiformes	0	x	0	0	0	x	0	0	0
Brycon pesu	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Ageneiosus inermis	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Brycon withei	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Ageneiosus pardalis	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Chalceus macrolepidotus	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Cetopsis plumbea	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Colossoma macropomum	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Acantodoras cataphractus	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Cynopotamus atratoensis	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Doraops zuloagai	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Jupiaba asymmetrica	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Oxydoras niger	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Jupiaba zonata	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Pterodoras rivasi	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Moenkhausia cotinho	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Hypophthalmus fimbriatus	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Moenkhausia lepidura	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Hypophthalmus marginatus	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Moenkhausia sanctaefilomenae	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Leiarius marmoratus	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Myleus schomburgkii	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Brachyplatystoma filamentosum	Siluriformes	0	x	0	x	0	x	0	0	x
Myloplus rubripinnis	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Brachyplatystoma juruense	Siluriformes	0	x	0	x	0	0	x	0	x
Mylossoma acanthogaster	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Brachyplatystoma platynemum	Siluriformes	0	x	0	x	0	0	x	0	x
Mylossoma aureum	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Brachyplatystoma rousseauxii	Siluriformes	0	x	0	x	0	0	x	0	x
Mylossoma duriventre	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Brachyplatystoma tigrinum	Siluriformes	0	x	0	0	0	0	x	0	0
Piaractus brachypomus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Brachyplatystoma vaillantii	Siluriformes	0	x	0	x	0	0	x	0	x
Salminus affinis	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Calophysus macropterus	Siluriformes	0	x	0	x	0	x	0	0	x
Salminus hillari	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Duopalatinus malarmo	Siluriformes	0	x	0	0	x	0	0	0	0
Thayeria obliqua	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Phractocephalus hemiliopterus	Siluriformes	0	x	0	0	0	x	0	0	0
Tetragonopterus argenteus	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Pimelodus blochii	Siluriformes	0	x	0	x	0	0	x	0	x
Triportheus albus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Pimelodus blochii magdalena	Siluriformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Triportheus angulatus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Pimelodus grosskopfii	Siluriformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Triportheus brachipomus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Pimelodus ornatus	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Triportheus venezuelensis	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Pimelodus pictus	Siluriformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Curimata aspera	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Pinirampus pirinampu	Siluriformes	x	0	0	0	0	0	x	0	0
Curimata cyprinoides	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Platynematchthys notatus	Siluriformes	0	x	0	x	0	0	x	0	x
Curimata mivartii	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Pseudoplatystoma magdaleniatum	Siluriformes	0	x	0	x	0	x	0	0	x
Curimata vittata	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Pseudoplatystoma metaense	Siluriformes	0	x	0	x	0	0	x	0	x
Curimatella alburna	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Pseudoplatystoma orinocoense	Siluriformes	0	x	0	x	0	0	x	0	x
Cyphocharax magdalenae	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Pseudoplatystoma tigrinum	Siluriformes	0	x	0	x	0	0	x	0	x
Cyphocharax nigripinnis	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Sorubim cuspicaudus	Siluriformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Psectrogaster ciliata	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Sorubim lima	Siluriformes	0	x	0	0	0	x	0	0	0
Psectrogaster rutiloides	Characiformes	x	0	0	0	x	0	0	0	0	Sorubimichthys planiceps	Siluriformes	0	x	0	x	0	x	0	0	x
Potamorhina altamazonica	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Zungaro zungaro	Siluriformes	0	x	0	x	0	x	0	0	x
Cynodon gibbus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Cichla orinocensis	Perciformes	0	x	0	0	0	x	0	0	0
Hydrolycus armatus	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Plagioscion magdalenae	Perciformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Hydrolycus scomberoides	Characiformes	x	0	0	0	0	x	0	0	0	Plagioscion squamosissimus	Perciformes	0	x	0	0	0	x	0	0	0

DES: Desconocido. LOC: Local. LON: Longitudinal. MC: Migración Corta (<100 km). MM: Migración Mediana (100-500 km). MG: Migración Grande (500-3000 km). NC: No Catalogada. RNI: Migrante Local. TRF: Transfronterizo.

Fuente: Zapata and Usma (2013)

Entre las especies migratorias reportadas Zapata and Usma (2013), se encuentran la *Brachyplatystoma filamentosum* (Valentón), *Calophysus macropterus* (Mota) y la *Zungaro zungaro* (Amarillo), las cuales tienen un valor pesquero importante para las comunidades. Recientemente Zapata et al. (2020) con el ánimo de informar a los pescadores sobre la riqueza del recurso pesquero en Colombia (pautas para el aprovechamiento y conservación) generaron una cartilla denominada “Recursos pesqueros de Colombia. Principales especies, conservación y pesca responsable”. En esta, para cada especie se resalta la distribución, ilustrando los cauces de los ríos en los cuales tiene presencia la especie. En la **Figura 18** se presentan las fichas generadas por Zapata et al. (2020) de las tres especies de peces anteriormente mencionada.

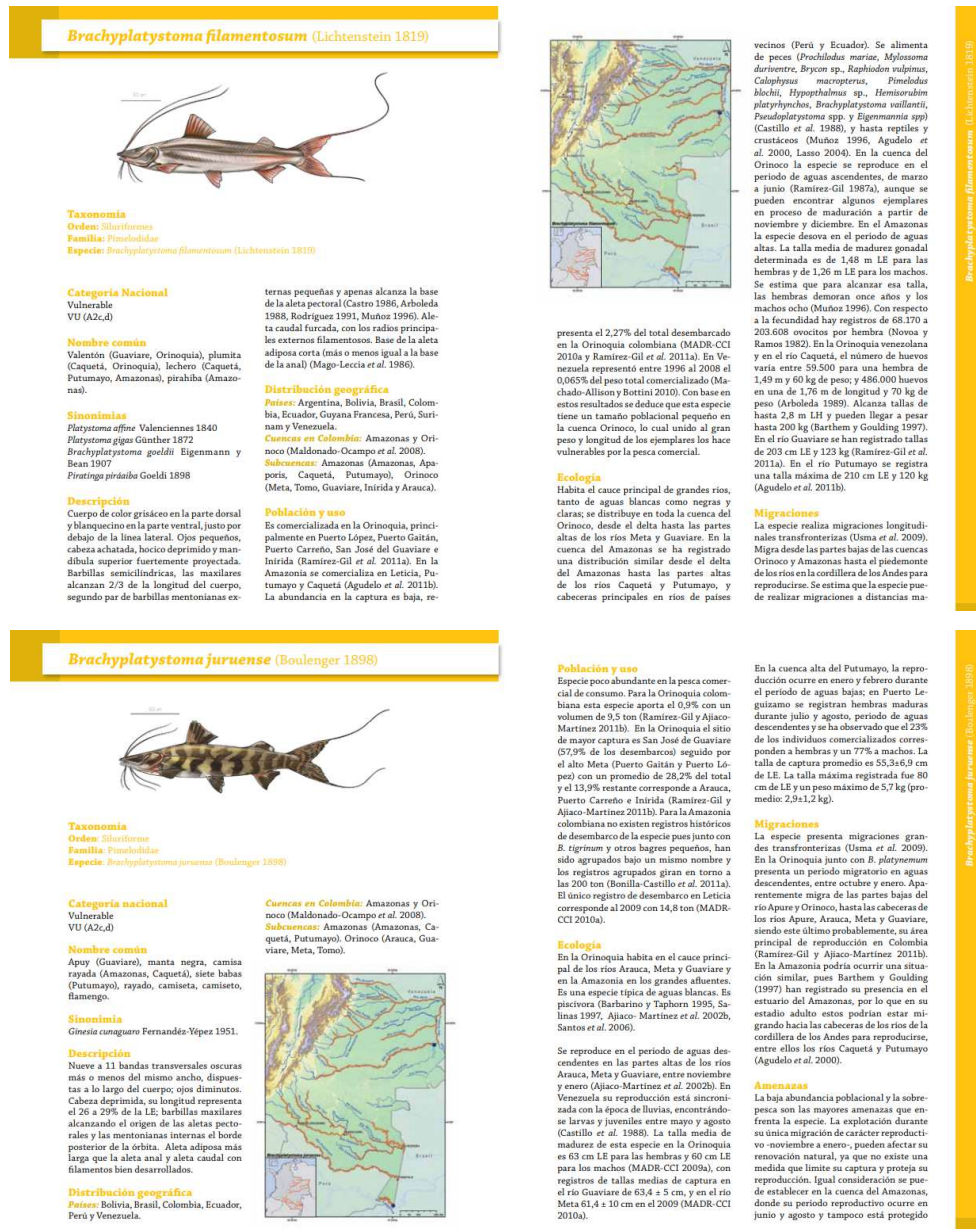
Figura 18. Especies de peces migratorias con valor pesquero.



Fuente: Zapata et al. (2020)

De otro lado, producto de los cambios generados en el uso del suelo (deforestación y expansión agrícola), la minería, la contaminación y la sobrepesca, muchas de las especies migratorias presentes en Colombia se encuentran amenazadas o en peligro de extinción. Especies como la *Brachyplatystoma filamentosum* y la *Brachyplatystoma juruense*, han estado reportadas como vulnerables El Libro Rojo de Peces Dulceacuícolas de Colombia (Mojica et al., 2012). Lo interesante del trabajo de Mojica et al. (2012), en el contexto de los corredores migratorios, es que, para cada especie, estos autores presentan su distribución resaltando los cauces de los ríos en los cuales tiene presencia la especie (ver **Figura 19**).

Figura 19. Fichas de dos especies migratorias en condición de amenaza



Como se ha resaltado, han sido múltiples los esfuerzos que han realizado diversos investigadores para mapear la distribución y las rutas de migración de las especies de peces migratorias dulceacuícolas en Colombia, sin embargo, la mayoría de las investigaciones no disponen de los archivos espaciales de las rutas migratorias o de la distribución de las especies. Por tanto, para la construcción de los corredores migratorios en la vertiente de Orinoco en Colombia, se han planteado las siguientes decisiones metodológicas:

- De las investigaciones de Zapata & Usma (2013), Mojica et al. (2012) y Zapata et al. (2020) se han identificado el nombre de los ríos y las extensiones aproximadas de los mismos, de acuerdo con los mapas presentados por cada autor.

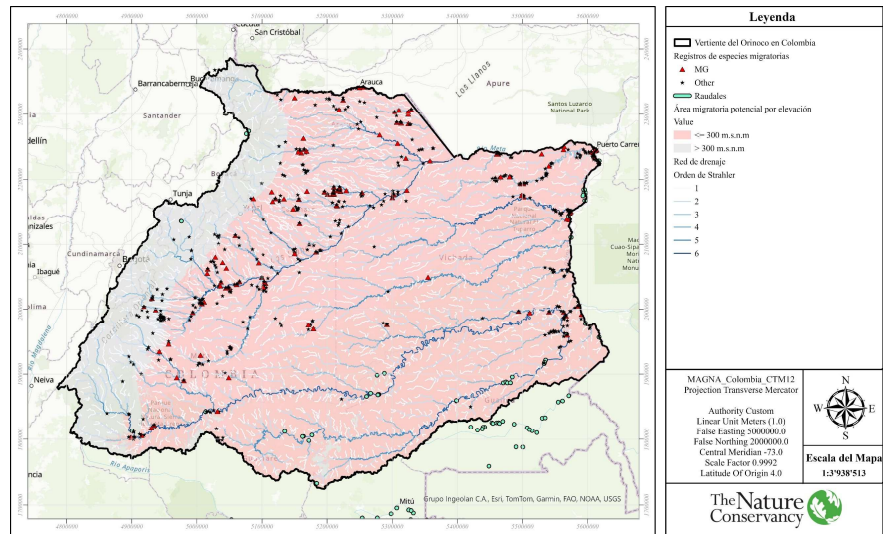
- Se consultaron en GBIF los registros de presencia ausencia de las 106 especies de peces migratorios reportadas por Zapata & Usma (2013). Estas se especializaron en ArcGIS y se identificaron los ríos con presencia de estas especies.
- Dado que la Vertiente del Orinoco en Colombia tiene presencia de varios raudales, principalmente en la cuenca del río Guaviare, se utilizó como criterio de transitividad los registros de las especies de peces con desplazamientos entre los 500 km y 3000 km. El criterio considerado fue: Si se identifica que un afluente con presencia de raudales es corredor migratorio para al menos una especie, se considera la ruta hasta el primer raudal que se identifique en dirección aguas arriba del afluente. No obstante, si existen registros de GBIF de especies migratorias aguas arriba del raudal¹, el corredor se extenderá hasta el sitio del registro hasta la longitud que sea estimada de los estudios anteriormente mencionados
- Tomando en cuenta que Lucas y Baras (2001) reportaron que las zonas de piedemonte en la Amazonía y Orinoquía son sitios probables de desove para los Siluriformes migratorios; y que, además, Cañas y Waylen (2011), registran para Siluriformes migratorios, posibles áreas de desoves en el río Madre de Dios a los 200-300 m.s.n.m (Quiñones, 2023). Para efectos de estimar los corredores migratorios de la Vertiente del Orinoco en Colombia, se ha considerado las áreas inferiores a la cota de 300 m.s.n.m como áreas potenciales de migración. Esta información se obtiene a partir del modelo de elevación digital de terreno de 12.5 metros.
- Los pasos anteriores se armonizaron para construir los corredores migratorios, utilizando como base espacial las 4243 microcuencas definidas para la Vertiente del Orinoco en Colombia, se filtraron

Siguiendo las decisiones metodológicas planteadas, se encontró que, en total, para Vertiente del Orinoco en Colombia de acuerdo con los registros de GBIF solo hay presencia de 75 de las 106 especies de peces migratorias reportadas por Zapata & Usma (2013). De acuerdo con la clasificación migratoria por desplazamiento efectuada por Zapata & Usma (2013), las especies identificadas, en su mayoría presentan migraciones cortas a medias, es decir que los desplazamientos no superan los 100 km y 500 km respectivamente. Sin embargo, se obtuvieron registros de 8 especies de peces con migraciones grandes (MG) (del orden Siluriformes), es decir con recorridos entre los 500 km y 3000 km (ver Figura 20). De acuerdo reportado por Quiñones (2023) en Colombia se han registrado 36 especies de bagres migratorios pertenecientes al orden Siluriformes, distribuidos en 4 familias: Pimelodidae, Doradidae, Auchenipteridae y Cetopsidae, según los criterios de Zapata & Usma (2013). En específico, la cuenca del río Orinoco tiene el mayor número de especies migratorias, con 25 especies registradas, seguida de la cuenca del Amazonas con 24 especies, mientras que las cuencas del Magdalena y del Caribe tienen 5 especies cada una.

Al considerar el criterio de elevación (menor a 300 metros sobre el nivel del mar), se identificó que las zonas de piedemonte, llanura y altillanura de la Orinoquía, así como el bioma amazónico que incluye la vertiente del Orinoco, podrían funcionar como corredores migratorios potenciales, quedando por fuera solo la región de la Cordillera de los Andes (ver **Figura 20**).

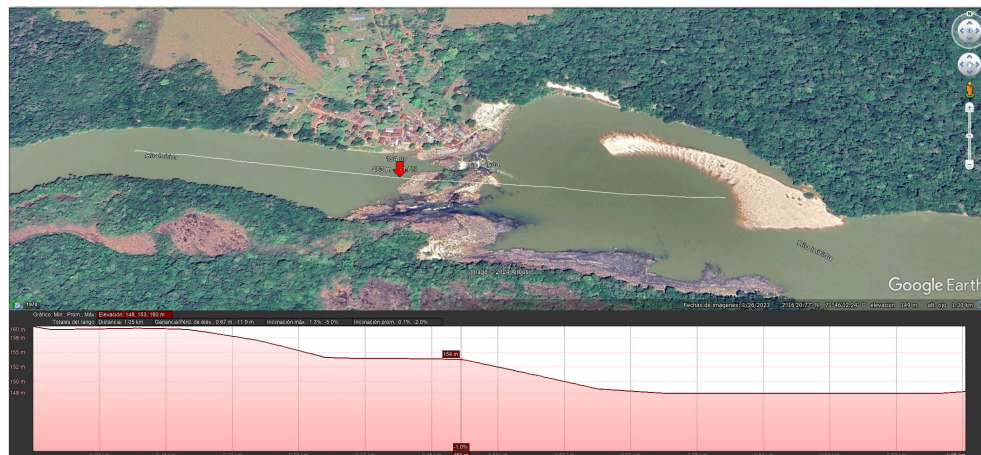
¹ Raudales consolidados en la cartográfica IGAC 1:100'000 para todo Colombia

Figura 20. Registros de GBIF, raudales y áreas potenciales de migración por elevación



Basado en las investigaciones de Zapata & Usma (2013), Mojica et al. (2012) y Zapata et al. (2020), se ha establecido que el cauce principal del río Inírida actúa como un corredor migratorio para diversas especies de peces migratorios. Sin embargo, se observó que las rutas de migración y distribución de estas especies se ven limitadas en el área previa al Raudal Las Chulas. Al analizar el perfil topográfico del río en la zona del raudal, se descubrió que existe una elevación del terreno con una caída abrupta de aproximadamente 7 metros. Esta característica geográfica impide efectivamente el paso de los peces hacia aguas arriba (ver **Figura 21**).

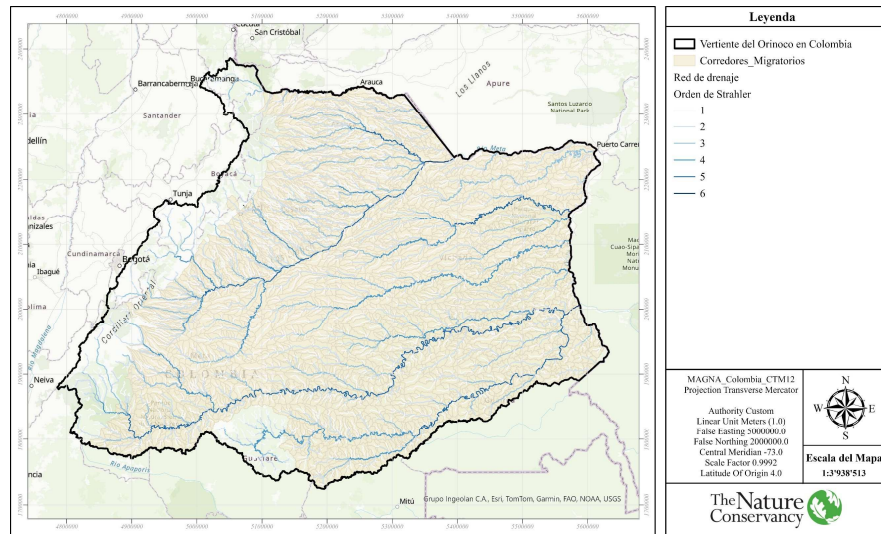
Figura 21. Perfil de elevación del Raudal Las Chulas



Como consecuencia de esta barrera natural, las microcuencas localizadas aguas arriba del Raudal Las Chulas han sido excluidas de la categorización como corredor migratorio.

El resultado final de corredores migratorios de especies dulceacuícolas después de cruzar todos los criterios propuestos se presenta en la **Figura 22**.

Figura 22. Corredores migratorios de especies dulceacuícolas



En general, los resultados presentados en la **Figura 22** deja ver que las cuencas de los ríos Vichada, Tomo, Bitá y sus tributarios, todos afluentes del río Orinoco, como importantes corredores migratorios. Del mismo modo, se identifica a las cuencas de los ríos Meta y Guaviare como corredores migratorios, aunque se excluyen las zonas que forman parte de la cordillera de los Andes debido a sus características geográficas y topográficas (elevaciones > 300 m.s.n.m). Por último, la cuenca del río Inírida también se clasifica como un corredor migratorio, pero esta clasificación se limita hasta el Raudal Las Chulas, punto más allá del cual el terreno impide la migración de peces.

5.1.8 Áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad de agua dulce

La identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad para la cuenca del río Orinoco, tomando de referencia el estudio Lasso et al. (2010). Esta identificación se realizó teniendo en cuenta los grupos (flora y vegetación, insectos, peces, anfibios y reptiles, aves y mamíferos), donde por cada uno se definió las subregiones biogeográficas pertinentes y se analizó el estado del conocimiento. Este estado de conocimiento considera tres variables: esfuerzo de muestreo, nivel de conocimiento y vacíos de información y la valoración de importancia biológica considera: riqueza, número de endemismos, número de especies amenazadas, número de especies con valor de uso y procesos ecológicos o evolutivos relevantes.

Se definieron unas áreas prioritarias para la conservación de todos los grupos que se consideraron, las cuales se detallan a continuación:

1. Alto río Meta

Esta zona está localizada en el piedemonte andino de la cordillera oriental. Se encuentra en el departamento de Meta principalmente y en menor proporción en departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Abarcando especialmente los municipios Castilla La Nueva, San Carlos de Guaroa, Acacias, Villavicencio, Restrepo, Cumaral, Medina, Paratebueno, Cabuyaro, Barranca de Upía, Ubala, Santa María, San Luis de Gaceno y Puerto López. La delimitación del área fue la siguiente:

- Norte y norte-este: se delimitó por el río Cienegal hasta su confluencia con el río Upía.
- Este: desde el río Upía hasta su confluencia con el río Meta que después se convierte en el río Metica.

C) Sur: desde el río Metica hasta su confluencia con el río Humadea.

D) Oeste - noroeste: aguas arriba por el río Humadea hasta el corte con el límite del piedemonte hasta su cruce con el río Cienegal.

Esta zona es prioritaria para conservación de especies como peces, anfibios y mamíferos.

2. Alto río Guaviare

Se localiza en el piedemonte andino de la cordillera oriental en el departamento del Meta involucrando a los municipios de La Macarena, Vista Hermosa, Mesetas, San Juan de Arama, Puerto Lleras, Puerto Rico, Fuente de Oro, Granada, El Castillo y El Dorado, entre otros. La delimitación de esta área corresponde a la siguiente:

A) Oeste: con la parte oriental de la sierra de La Macarena y después de la cota de 500 m hasta el límite de la subcuenca del río Ariari.

B) Norte: límite subcuenca del río Ariari.

C) Este: límite subcuenca del río Ariari hasta cruce con subcuenca del río Guejar.

D) Este-sur: se retoma el límite de la sierra de La Macarena. Parte de esta área se encuentra dentro del Parque Nacional Natural Sierra de la Macarena.

Esta zona es prioritaria para conservación de especies como peces, anfibios.

3. Estrella Fluvial de Inírida

Esta área incluye el río Atabapo, Inírida y boca del Guaviare, abarca los departamentos de Guainía y Vichada. Se extiende desde los nacimientos del caño Guasacaví hasta el río Matavén, incluyendo los tributarios directos, sobresaliendo la confluencia de los ríos Inírida, Atabapo, Guaviare y Orinoco.

Esta zona es prioritaria para conservación de especies como peces, mamíferos y aves.

4. Corredor Bitá-Meta-Orinoco

Este corredor comprende las zonas bajas de las cuencas del río Meta y Bitá, los cuales desembocan en el Orinoco sobre la ciudad de Puerto Carreño en Vichada.

Esta zona es prioritaria para conservación de especies como peces, anfibios, mamíferos, aves.

5. Corredor Meta-Casanare

Esta localizado en las planicies aluviales de los ríos Meta y Casanare, en los departamentos de Vichada, Casanare, Arauca, y Meta. Siendo los municipios de Orocué, San Luis de Palenque, Trinidad, Paz de Ariporo, Hato Corozal, Cravo Norte, La Primavera, Santa Rosalía y Puerto Gaitán. La delimitación de este corredor corresponde a 5 km alrededor del cauce de los ríos Casanare y Meta, a esta área se encuentran cercanas las sabanas de La Esmeralda, Camuara y El Campín.

Esta zona es prioritaria para conservación de especies como anfibios, mamíferos y aves.

6. Humedales de Casanare (Paz de Ariporo – Hato Corozal)

Se ubican en las sabanas inundables del departamento de Casanare, municipio de Paz de Ariporo. La delimitación por el norte corresponde al río Ariporo hasta su confluencia con el caño Palones Grandes. En el este va en línea recta hasta el límite del área nominada “Corredor Meta-Casanare”. En el sur toma el curso del caño Picapico y de otros drenajes menores que luego conectan por el oeste en línea recta con el río Ariporo, nuevamente.

Esta zona es prioritaria para conservación de especies como mamíferos y aves.

7. Humedales de Arauca

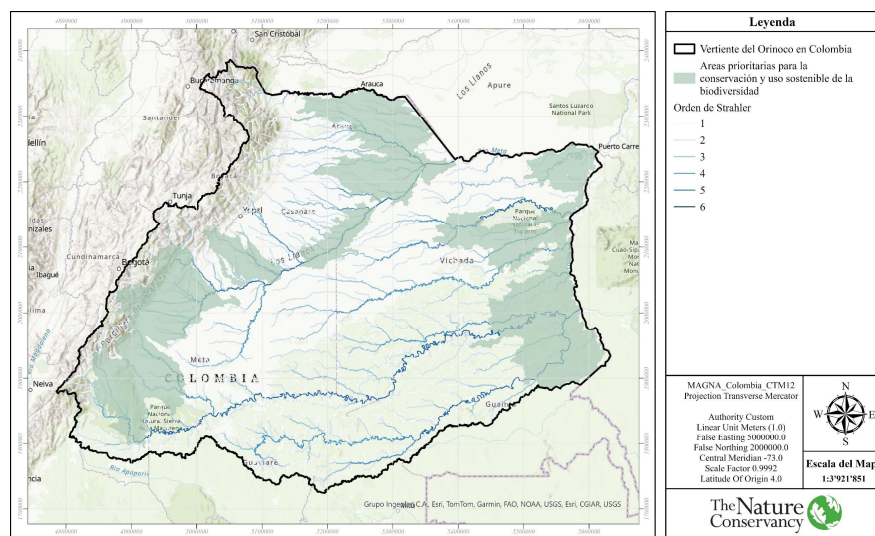
Se ubica en el departamento de Arauca en las sabanas inundables, incluyendo los municipios Cravo Norte, Arauca y Arauquita. La delimitación fue la siguiente: en el norte corresponde a los cursos de varios ríos y drenajes secundarios incluyendo un tramo del río Arauca y Capanaparo, y los caños Las Dantas, Agua Verde, Manantiales y Cubarro. Por el este desde el río Capanaparo traza una línea recta para tomar el río Riecito en el municipio Rómulo Gallegos (Venezuela). Hacia el sur el río Cinaruquito y el caño Los Araguatos y de ahí en línea recta hasta la confluencia del río Cravo Norte con el río Casanare. Por el oeste el río Cravo Norte hasta el río Lipa, luego el río Ele o Cusay, el caño El Dorado y conecta con el río Lipa nuevamente.

8. Cuenca ríos Tomo y Vichada

Abarca la parte baja del interfluvio de los ríos Tomo y Vichada, excluyendo el Parque Nacional Natural El Tuparro, partiendo desde el oeste a la altura del caño Yacuera en Vichada.

Al tener definidas estas áreas prioritarias de conservación dentro de la cuenca, para poder mapear el resultado se identificó la ausencia de esta información. Por esto, se optó por cartografiar las áreas presentadas en la imagen. Este proceso se realizó georreferenciando la imagen y posteriormente construyendo las áreas. Ya teniendo las áreas espacialmente se le asignó un valor de (1) a aquellas microcuencas dentro de la VRO que tenían alguna porción de su área dentro de los polígonos definidos como áreas prioritarias, e igual se asigna (0) a las microcuencas que no contaban con área prioritaria. En la **Figura 23** se pueden evidenciar las áreas previamente descritas que se ubican en departamentos como Meta, Vichada, Inírida, Casanare, Arauca y Guaviare.

Figura 23. Áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad para la VRO



Fuente: Lasso et al. (2010)

5.2 Servicios ecosistémicos

Este apartado aborda el contexto de los servicios ecosistémicos, los cuales se dividen en distintos tipos. Se enfocará principalmente en los servicios de aprovisionamiento, destacando las especies de valor tanto para consumo como para fines ornamentales. Además, se realizará un análisis detallado del servicio cultural, centrándose en la recreación y el turismo. Se desarrollará un modelo para comprender cómo

estos servicios se comportan en la cuenca, y se describirán algunos de los paisajes más emblemáticos de la región.

Los servicios ecosistémicos son el conjunto de propiedades ambientales que se derivan de estructuras y procesos, los cuales se organizan desde un punto de vista antropocéntrico, por ser útiles y necesarios para el bienestar humano. A partir de esto, se dice que los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas (Chicharo et al., 2015; Wallis et al., 2011).

Estos beneficios derivados del uso de los componentes de la biodiversidad son vitales para la existencia por los servicios ambientales que se utilizan para las actividades cotidianas como lo son alimentos, oxígeno, agua entre otros. Estos servicios se dividen en cuatro grandes grupos (WWF, 2022).

1. **Servicios Culturales:** Son valores o beneficios no materiales que se pueden obtener de la naturaleza a través del enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, el disfrute de la naturaleza. Como ejemplo de estos servicios pueden ser la recreación y el ecoturismo.
2. **Servicios de Regulación:** Estos servicios hacen referencia a aquellos bienes producidos por la regulación de los ecosistemas, dentro de estos se pueden encontrar la calidad del aire, regulación del clima, control de enfermedades humanas entre otros.
3. **Servicios de Aprovisionamiento:** Los servicios de aprovisionamiento son los obtenidos de la naturaleza para el consumo o utilización ya sea de manera directa o con algún procesamiento. Ejemplos de estos servicios son, alimentos, madera, agua, recursos energéticos entre otros (Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) and Instituto Humbolt, 2022).
4. **Servicios de Sostenimiento:** Son los procesos ecológicos para el aprovisionamiento y existencia de los otros servicios ecosistémicos. Dentro de estos se puede encontrar el ciclo de nutrientes o la formación de suelos.

En el contexto de los servicios ecosistémicos, es fundamental destacar aquellos relacionados con el aprovisionamiento, que engloban tanto recursos para consumo directo como para cualquier tipo de uso. En este sentido, se analizará detalladamente cómo la biodiversidad de la VRO contribuye a estos servicios de aprovisionamiento, identificando las especies clave para consumo y para uso ornamental.

5.2.1 Especies de agua dulce de uso ornamental

Colombia tiene una de las mayores diversidades en ictiofauna dulceacuícolas y muchas de estas especies tienen gran importancia económica por su aprovechamiento para uso ornamental. Esta actividad se realiza con fines de exportación desde la década de 1950 (Galvis et al., 2007) y desde ese entonces no existe un amplio conocimiento biológico o ecológico para que se permita un aprovechamiento sostenible de este recurso. La Orinoquía es el área que más aporta en número de especies de peces ornamentales, calculando que un 60 a 80% de peces provienen de esta región. Dentro de la VRO la captura de los peces para uso ornamental la realizan habitantes de poblaciones como Puerto Gaitán, Puerto Inírida, Puerto Carreño, Arauca, Villavicencio entre otras. Por consiguiente, muchas familias de estas áreas dependen económicamente de esta actividad, por esta razón se considera como un valor de conservación en la VRO.

Las especies de piedemonte que el centro de acopio principal es Villavicencio, provienen de las corrientes claras que tienen en sus cabeceras en los abanicos y meses de piedemonte (Galvis et al., 2007). Por el lado de Puerto Gaitán, la pesca se da en morichales, esteros y lagunas de desborde. Para la zona de Inírida, la pesca se realiza en ríos, caños y lagunas entre ellos el río Inírida con los afluentes Caño Caimán, caño Bocón y caño Agujón, seguido a este río también está el Atabapo, Orinoco y Guaviare.

La extracción para peces ornamentales se establece teniendo en cuenta la demanda del mercado internacional, sin embargo, no se hace de una manera sostenible debido a que no se realiza investigación que permita establecer información de tasas de captura y esfuerzo a la que están sometidas sus poblaciones. Entre el proceso de captura y sitios de acopio y en los puertos de embarque para su exportación, los ejemplares sufren altas mortalidades principalmente en la cadena de comercialización donde los peces sufren por factores estresantes lo que hace que la cifra de ejemplares extraídos sea mayor a la de exportados.

Dentro de las especies que se usan para fines ornamentales en la cuenca del Orinoco se encuentran estos ejemplares:

Tabla 13. Ejemplares de especies para uso ornamental en la VRO

Especie	Descripción	Imagen
Dicrossus filamentosus	Conocido como Cíclido Ajedrez miden unos 9 a 6 cm dependiendo si es macho o hembra, se encuentra en zonas con poca corriente, aguas negras, ubicado en la cuenca del Orinoco en el río Inírida más específicamente (Aquariofilia, 2023)	
Crenicichla anthurus	Conocido como Cíclido Bandera son peces de 50 a 55 cm de longitud. Se encuentra en la cuenca del Orinoco en ríos Atabapo, Inírida y Guaviare (MiPEZ (TNC), 2022).	
Hemigrammus micropterus	Estos peces cuentan con un largo de 4 cm, se encuentran en la cuenca del Orinoco, en la cuenca del río Pauto (GBIF, 2023).	

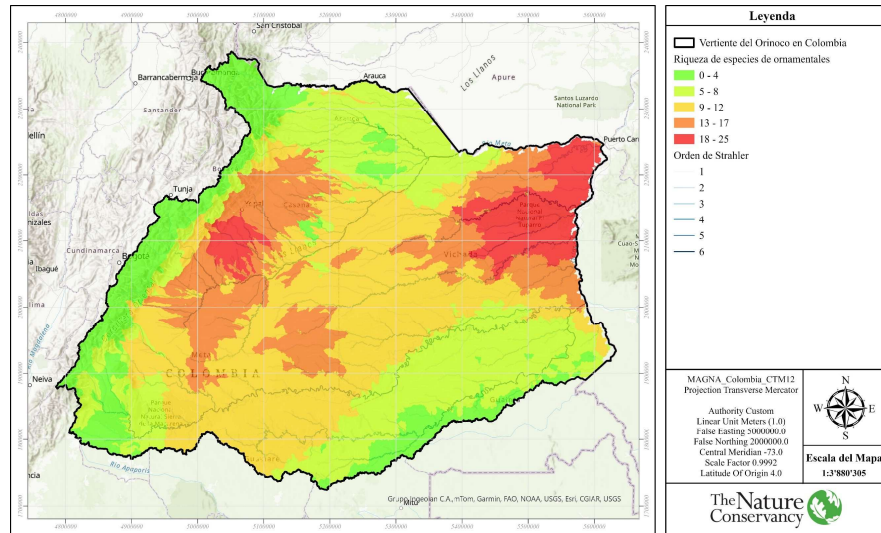
La información de las especies de peces de uso ornamental que se consideraron como valores de conservación en la VRO, se obtuvo de los BioModelos del Humboldt (Velásquez-Tibatá et al., 2019). En la **Tabla 14** se listan las especies utilizadas.

Tabla 14. Lista de especies de peces de uso ornamental consideradas como valor de conservación en VRO.

Especies de uso Ornamental Consideradas			
Acestrorhynchus microlepis	Gymnocorymbus thayeri	Charax gibbosus	Microglanis poecilus
Aequidens tetramerus	Gymnotus carapo	Chilodus punctatus	Moenkhausia collettii
Aphyocharax alburnus	Hemigrammus micropterus	Crenicichla anthurus	Moenkhausia dichrourea
Apistogramma ortmanni	Hemiodus gracilis	Crenicichla saxatilis	Moenkhausia lepidura
Biotodoma wavrini	Hemiodus unimaculatus	Crenicichla wallacii	Moenkhausia oligolepis
Bryconops giacopinii	Iguanodectes spilurus	Ctenopoma spilurus	Mylossoma duriventre
Bujurquina mariae	Leporinus muyscorum	Dekeyseria scaphirhyncha	Plagioscion squamosissimus
Carassius auratus	Limatulichthys griseus	Dicrossus filamentosus	Poecilia reticulata
Characidium steindachneri	Mesonauta insignis	Eigenmannia virescens	Poecilia sphenops
		Farlowella vittata	

En la **Figura 24** se presenta la distribución de la riqueza de las especies de peces de uso ornamental consideradas como valore de conservación en la VRO. Como se logra observar, en las áreas que corresponde a departamento del Meta tiene altos valores de riqueza como también varias zonas del departamento del Vichada, en contraste con menor riqueza de especies se encuentra en lo que abarca la cordillera oriental, este contraste puede atribuirse a una serie de factores, como las variaciones en los hábitats disponibles, la presencia de ecosistemas más diversos y la influencia de la actividad humana en la modificación del paisaje.

Figura 24. Distribución riqueza de especies de peces de uso ornamental consideradas como valor de conservación en la VRO.



5.2.2 Especies de agua dulce de consumo

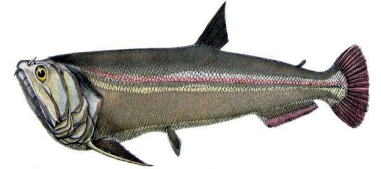
La diversidad de especies de agua dulce que se encuentran en la VRO es de vital importancia para el consumo humano y sustento de muchas comunidades locales, haciendo de estas un valor de conservación muy importante. Las cuencas de acuerdo con el tipo de aguas tienen diferente vocación pesquera y por lo general los ríos de aguas blancas apuntan hacia las pesquerías de consumo.

Las capturas de las especies para consumo se obtienen en los periodos de aguas bajas enero a marzo, para los meses de abril a diciembre que es la temporada de lluvias de aguas descendentes, bajas y ascendentes se aumentan las capturas y la actividad de los pescadores. Para los meses de mayo y junio se presentan bajas capturas debidas a la veda (Insituto Humbolt Colombia et al., 2018).

La pesca es de gran importancia para los habitantes de la región por su aporte alimenticio. En la región se aprecia mucho las especies como la payara, bocachicos, cachamas, morocotos entre otros. Por ejemplo, la cachama es de gran relevancia al proporcionar alimento y también por ser una especie clave en la acuicultura debido a su rápido crecimiento y resistencia a diversas condiciones ambientales. El bocachico es un pez común en la VRO por su valor nutricional y su importancia a nivel de pesca comercial.

Con el fin de entender su importancia en el ecosistema y su potencial para el consumo humano, se describen a continuación algunos ejemplares que son importantes para el consumo dentro de la VRO.

Tabla 15. Ejemplares de especies para consumo en la VRO

Especie	Descripción	Imagen
<i>Colossoma macropomum</i>	Conocido como Cachama negra o Pacú, mide alrededor de 80 cm, se encuentra a profundidades entre los 0 a 5 metros, se encuentra distribuido por el río Orinoco (CANABIO, 2017).	
<i>Hydrolycus scomberoides</i>	Conocido como Payara, es de agua dulce y clima tropical, mide alrededor de 120 cm y pesa casi 18 kilos, presente en la cuenca del río Orinoco (animales Colombia, 2020)	
<i>Oreochromis niloticus</i>	Conocido como la Tilapia del Nilo, su peso máximo es de 5 kilogramos, se encuentra en profundidades de 0 a 5 metros (Fundación Charles Darwin, 2022).	

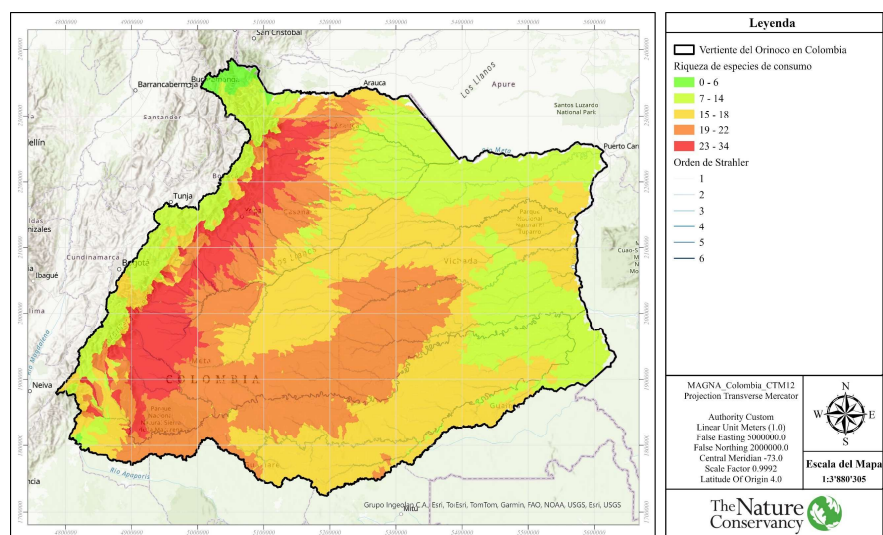
La información de especies de peces para consumo se extrajo de los BioModelos del Humboldt (Velásquez-Tibatá et al., 2019). En la **Tabla 16** se listan las especies de peces de consumo que fueron consideradas como valores de conservación en la VRO.

Tabla 16. Lista de especies de peces para consumo consideradas como valores de conservación en la VRO.

Especies de Consumo	
Arapaima gigas	Leiarius marmoratus
Astyanax fasciatus	Leporinus muyscorum
Biotodoma wavrini	Mylossoma duriventre
Bujurquina mariae	Oncorhynchus mykiss
Caquetaia kraussii	Oreochromis mossambicus
Colossoma macropomum	Oreochromis niloticus
Crenicichla anthurus	Parodon apolinari
Cyprinus carpio	Piaractus brachypomus
Hoplias malabaricus	Pimelodus blochii
Hydrolycus scomberoides	Pinirampus pirinampu
Hypostomus hondae	Plagioscion squamosissimus
Hypostomus pyrineusi	Prochilodus magdalenae

En la **Figura 25** se presenta la distribución de la riqueza de las especies de peces de consumo consideradas como valor de conservación en la VRO. Como se logra apreciar, los departamentos del Meta y Casanare tienen altos valores de riqueza como también parte de Vichada e Inírida, en contraste con menor riqueza de especies para consumo se encuentra en lo que abarca la cordillera oriental y por los departamentos de Arauca y Guainía, que pueden presentarse por cambios en los ecosistemas y hábitats propicios para la subsistencia de estas especies.

Figura 25. Distribución de riqueza de especies de consumo consideradas como valor de conservación en la VRO



5.2.3 Recreación y turismo

Los servicios culturales son los beneficios no materiales obtenidos de los ecosistemas, por medio del enriquecimiento espiritual, la recreación, inspiración artística y cultural. En este sentido la recreación y turismo como servicio ecosistémico presente en la VRO.

La recreación y el turismo se destacan por su capacidad para generar beneficios económicos, sociales y ambientales, de aquí que sea considerado como un valor de conservación. Estas actividades presentan una importante fuente de ingresos para las comunidades locales y economías regionales a través del gasto de actividades, alojamiento, alimentación, transporte. Es importante establecer que el manejo del turismo se busca de forma responsable y sostenible con el objetivo de la conservación y preservación de ecosistemas para poder mantener el interés turístico y las actividades recreativas.

Por parte del beneficio social que genera este servicio ecosistémico, se fomenta el intercambio y enriquecimiento cultural entre diferentes regiones, así mismo puede impulsar el desarrollo comunitario y económico de poblaciones locales, al generar empleos, mejora de infraestructura y servicios.

En la VRO, existe variedad de ecosistemas que ofrecen un turismo sostenible lleno de reservas naturales, con una amplia riqueza de fauna y flora. A continuación, se describen algunos de los paisajes icónicos que presenta la VRO.

Parque Nacional Natural El Tuparro

Este parque está ubicado en el departamento de Vichada con 548.000 hectáreas y sus principales tributarios son los ríos Guaviare, Vichada, Tomo, Tuparro, Meta y Arauca (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2022). Este se puede describir por sus extensas sabanas verdes, surcada por grandes ríos, bosques de galería, morichales y caños de aguas cristalinas. En él se calcula la presencia de 320 especies de aves, 74 de mamíferos, 17 especies de reptiles y 229 especies de peces. De los grandes atractivos de este parque está el Raudal de Maypures. Las actividades más relevantes para el turismo de este parque natural son el avistamiento de fauna, senderismo, canotaje.

Figura 26. Parque Nacional Natural El Tuparro



Fuente: <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/es/ecoturismo/parques/region-amazonia-y-orinoquia/parque-nacional-natural-el-tuparro/>

Caño Cristales

Caño cristales es un río ubicado en el Parque Nacional Serranía de la Macarena, en el departamento del meta, municipio de la Macarena. Su atractivo se debe a las aguas cristalinas que van del verde al amarillo, azul y rojo, estos colores debido a las especies de plantas y vida acuática (Colombia Travel, 2021). Durante la temporada de lluvias, la planta *Macarenia clavigera* se torna de un color rojo brillante en el lecho del río lo que crea una vista muy atractiva para los turistas.

Las actividades que se realizan en este destino son de avistamiento de fauna, senderos para la interpretación del patrimonio natural y cultural, baño en el río entre otras.

Figura 27. Caño Cristales, Meta



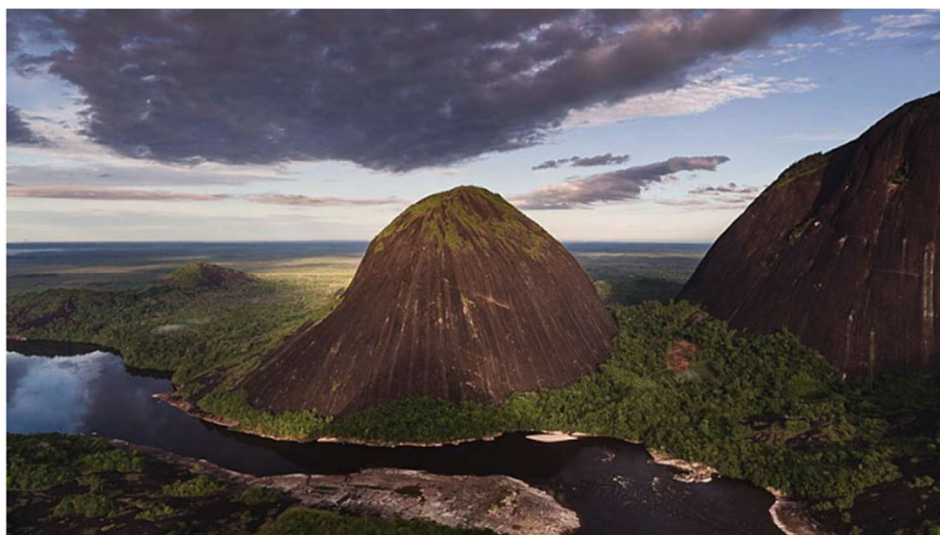
Fuente: <https://colombia.travel/es/la-macarena/cano-cristales-una-maravilla-natural>

Los Cerros de Mavecure

Están ubicados en el departamento de Guainía a orillas del río Inírida, se encuentran en el medio de la reserva indígena puinave de El Remanso (Organización Colparques, 2023). Son parte de la formación del escudo Guyanés, están clasificadas como rocas más antiguas a nivel global y son rocas graníticas oxidadas por la lluvia y la escasa vegetación. Los tres cerros se conocen por los nombres El Mono, El pájaro y Mavecuri.

Este paisaje no cuenta con amplia diversidad de flora y fauna debido a su carácter rocoso. Las actividades para conocer este destino son conocer los cerros de mavecure, interactuar con comunidades indígenas, navegar por el río con la probabilidad de encontrar y avistar delfines rosados.

Figura 28. Cerros de Mavecure, Inírida

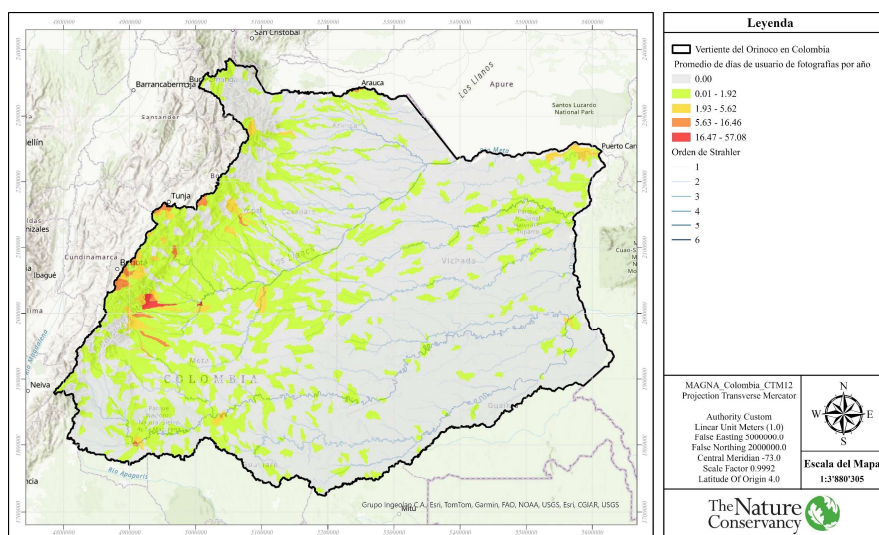


Fuente: https://viajandosinafan.com/st_evento/mavecure/

Para cuantificar el valor de los entornos naturales en términos de los servicios ecosistémicos de recreación y turismo, se utiliza el modelo de recreación de InVEST Visitation: Recreation and Tourism (Natural Capital Project, 2022), el cual predice la propagación de los días-persona de recreación, basándose en la ubicación de los hábitats naturales donde se realiza turismo dentro de un área en específico. Este modelo se basa en parametrizar las fotografías de visitas geoetiquetadas, a partir de esto el modelo predice como los futuros cambios en las características naturales alterarán los índices de visitas y genera de forma espacial los patrones actuales y futuros de uso recreativo.

Al modelo se ingresa la capa de las microcuencas generadas para la VRO, el periodo de búsqueda de fotografías fue del año 2005 al 2017. Con esto se considera el valor promedio anual de fotografías como el indicador de este valor de servicio ecosistémico. La distribución del promedio anual de fotografías en la VRO se presenta en la **Figura 29**. Los resultados muestran en una escala de colores que representa la cantidad de fotografías registradas en un periodo de tiempo específico. Las áreas sin fotografías se muestran en tonos de gris, las áreas con muy pocas fotografías aparecen en verde, y las áreas con el mayor promedio de fotografías registradas cada año se muestran en rojo. Siendo los departamentos con mayor promedio de fotografías Cundinamarca, Boyacá, Meta, Casanare y Vichada lo que sugiere una mayor atención y valoración de la biodiversidad y los recursos naturales en estas áreas.

Figura 29. Promedio días de usuario de fotografías por año en la VRO



5.3 Áreas de valores culturales

Las áreas de valor cultural corresponden a regiones geográficas con presencia de diversas comunidades indígenas, campesinas y Comunidades raizales. Estas comunidades poseen vínculos arraigados con el territorio y comparten una conexión con su entorno natural, lo que se refleja en sus prácticas culturales, sistemas de conocimiento y formas de vida tradicionales. Asimismo, este valor cultural tiene en cuenta las áreas de valor arqueológico las cuales permiten comprender y preservar el patrimonio y herencia cultural.

5.3.1 Resguardos indígenas

Las comunidades indígenas de la VRO son en su mayoría descendientes de las comunidades Arawak que a partir del siglo XIII se remontaron por el río Orinoco estableciéndose en las llanuras. Así mismo existe una incidencia de la familia Chibcha, que descendió desde la cordillera oriental hacia los llanos.

En la independencia las comunidades indígenas se vieron obligadas a permanecer en regiones selváticas por Guainía y Guaviare. La comunidad Sikuani bajo acuerdos se mantuvo en las riberas de los ríos Ariari, Guaviare y Manacacías (Universidad Nacional de Colombia, 2013).

El departamento de Vichada de mayoría indígena, los pueblos están distribuidos por su pertenencia y ocupación territorial ancestral que ha sido por cuencas hidrográficas. En el río Orinoco alto están los Sikuani, Puinaves, Piapocos y Piaroas. En el río Orinoco bajo se encuentran Sikuani, Piaroas, Sálibas y Amorua. En el río Vichada los Sikuani y Piapoco. Por el río Meta los Sálibas, Amoruas y Sikuani, en el Guaviare tienen presencia los Piapocos, Piaroas, Puinaves, Curripacos y Cubeos (Ministerio del Interior & ONIC, 2013). Los resguardos indígenas se distribuyen de manera diversa en los diferentes departamentos que hacen parte de la cuenca del río Orinoco, que refleja la diversidad étnica y geográfica de las poblaciones indígenas en Colombia. La **Tabla 17** asocia cada departamento con el grupo étnico presente en el territorio y la distribución poblacional por departamento.

Tabla 17. Grupos étnicos por departamento junto con la población total de indígenas presentes VRO

Departamento	Indígenas totales	Grupo Étnico
Vichada	17.663	Kurripako, Piapoco, Piaroa, Puinave, Sáliba, Sikuani
Guainía	11.595	Kurripako, Piapoco, Puinave, Sikuani, Yeral
Vaupés	11.587	Bara, Barasana, Carapana, Desano, Kawiari, Kubeo, Kurripako, Makuna, Nukak, Piratapuyo, Pisamira, Siriano, Taiwano, Tariano, Tatuyo, Tucano
Huila	10.335	Coyaima, Dujos, Nasa
Meta	8.988	Achagua, Guayabero, Nasa, Piapoco, Sikuani
Cundinamarca	7.401	U'wa, Muisca
Norte de Santander	7.247	Barí, U'wa
Boyacá	5.859	Muisca
Casanare	4.102	Amorúa, Kuiba, Masiguare, Sáliba, Sikuani, Tsiripu,
Guaviare	2.117	Desano, Guayabero, Karijona, Kubeo, Kurripako, Nukak, Piaroa, Piratapuyo, Puinave, Sikuani, Tucano, Wanano
Arauca	3.279	Betoye, Chiricoa, Hitnu, Kuiba, Piapoco, Sikuani

Fuente: Agencia Nacional de Tierras (2023)

De los pueblos indígenas con mayor presencia en la VRO, son los **Sikuani**. Este pueblo pertenece a la familia lingüística “Guahibo” que integra a las comunidades Guayabero, Kuiba, Hitnu y sikuani que están ubicados en los llanos orientales en departamentos Vichada, Meta, Casanare y Arauca.

Los Sikuani, son originarios de los llanos de la cuenca del río Orinoco, su territorio ancestral está demarcado a través de la tradición oral que señala los lugares de origen de su mundo y cultura.

El pueblo Sikuani, en su actividad de cultivo, presentan las siembras tradicionales donde se encuentran la yuca amarga, con diferentes variedades, batata, piña, entre otros, que se instauran en pequeñas porciones de tierra que oscilan entre media y dos hectáreas, denominados conucos, los cuales se establecen alrededor de las viviendas (Ministerio del Interior & ONIC, 2013).

Estos pueblos de tradición cultivadora, cazadora y recolectora usan sus habilidades para interactuar con el mundo capitalista y mercantilista para poder entrar al mercado por medio de la venta de productos agrícolas y de cacería que cambian por dinero, el cual lo utilizan para cubrir necesidades básicas o de subsistencia como alimentación.

Sin embargo, se debe resaltar que los procesos de violencia y desplazamiento forzado han obligado a estas comunidades a habitar tierras que no hacen parte de su territorio tradicional. Esto conlleva a dificultades crecientes en la realización de actividades tradicionales como cultivo, recolección y cacería.

Por el lado de los rituales que desarrolla esta comunidad Sikuani, una de las tradiciones más significativas que marca el ciclo de vida dentro de la etnia es la ceremonia de iniciación conocida como el "rezo del pescado". Esta ceremonia, de vital importancia, se enfoca en preparar a las jóvenes para la transición a la vida adulta. Otro ritual es el Itomo, hace parte del ciclo de ceremonias del segundo entierro (Ministerio del Interior & ONIC, 2013). Este ritual permite perpetuar la presencia del difunto y se convierte en una actividad social importante.

5.3.2 Consejos comunitarios – Comunidades Afro

Las comunidades negras, afrocolombianas, raizales y palenqueras son grupos étnicos que han sido reconocidos por el Estado Colombiano. Estas comunidades se autor reconocen como comunidades con una ascendencia cultural afro, es decir que tienen un vínculo ancestral con la cultura de personas provenientes del continente africano pero que han desarrollado sus prácticas culturales y saberes en Colombia (ASCOBA et al., 2016)

Las comunidades afro en la región de la Orinoquía se encuentran concentradas en su mayoría en Arauca, Casanare y Meta. La presencia de estas comunidades en la región corresponde a migraciones ocurridas en la década de los noventa y el auge del cultivo de palma de aceite en Meta y Casanare. Para el caso del

Guaviare, la población afrodescendiente proviene de Chocó, a causa del desplazamiento forzado y las dificultades económicas.

Estas comunidades se organizan en diferentes asociaciones y colectivos para promover sus derechos, mejorar las condiciones de vida y preservar su cultura. Que son conocidos como los consejos comunitarios, estos son la autoridad étnica que se encarga de administrar los territorios colectivos de las comunidades negras, afrocolombianas, raizales y palenqueras, creados por la Ley 70 de 1993 y reglamentados por el Decreto 1745 de 1995 (ASCOBA et al., 2016). Son reconocidos por autoridades nacionales y entidades internacionales.

En departamentos que hacen parte de la región de la Orinoquía, se han registrado solicitudes para la titulación colectiva de territorios por parte de los consejos comunitarios, estos se describen a continuación (Tabla 18):

Tabla 18. Consejos comunitarios por departamentos presentes en la VRO

Departamento	Descripción	Nombre Consejo Comunitario
Boyacá	Se presentó una titulación colectiva asociada al casco urbano del municipio de puerto Boyacá.	Asociación Afrocolombiana de Boyacá (AFROBOY)
Vichada	En este departamento se identifica un consejo comunitario, pero sin titulación de tierras. Está ubicado en el municipio de Cumaribo.	Consejo Comunitario de la Vereda Mata Grande
Guaviare	Para Guaviare, se identificaron 8 solicitudes de titulación colectiva en municipios de Miraflores, Calamar, El Retorno y San José del Guaviare	Consejo Mayor del río Guaviare, Consejo Comunitario Diego Luis Córdoba, Consejo Comunitario Piedad Esneda Córdoba Ruiz, Consejo Comunitario Mayor Nueva Esperanza, Consejo Comunitario Laureano Narciso Moreno, <u>Consejo Comunitario Nelson Mandela</u> , Consejo Comunitario Martin Luther King, <u>Consejo Comunitario Mayor de las comunidades negras de la cuenca alta del río Guaviare</u> .
Arauca	Existe un total de 10 solicitudes de titulación colectiva, 8 asociadas a veredas del municipio de Arauquita y 2 en los municipios de Tame y Arauca.	Consejo Comunitario El Oasis, Panamá de Arauca, Los Chorros la Gran Esperanza, El Triunfo, Los Gabanes 1 y 2, Vereda la Paz, Puerto Caimán, Melocipo Amu Arrechea.

Fuente: Agencia Nacional de Tierras (2023)

5.3.3 Reservas campesinas

Las zonas de reserva campesina son una figura de ordenamiento territorial, productivo y ambiental que se contemplan en la Ley 160 de 1994 y el Decreto 1777 de 1996 (Molina - Posada et al., 2017) para el cierre de la frontera agropecuaria a través de la estabilización de la economía campesina, formalización de la propiedad rural y superar los conflictos sociales en el campo.

Estas zonas permiten articular los esfuerzos de las organizaciones sociales, instituciones públicas y la cooperación internacional en contextos de gobernanza para alcanzar un manejo sostenible del territorio, sus ecosistemas estratégicos y áreas protegidas. Las zonas de reserva campesina surgen como posibilidad de conservación de ecosistemas y biodiversidad, sostenibilidad en la provisión de servicios ecosistémicos y el mejoramiento del bienestar humano.

En lo que corresponde a los departamentos que conforman la cuenca del río Orinoco se establecen cuatro zonas de reservas campesinas. Estas se describen a continuación (Tabla 19):

Tabla 19. Descripción de las zonas de reserva campesina presentes en la cuenca del río Orinoco.

Zona reserva Campesina	Descripción
Sumapaz, Cundinamarca	Aprobada en el 2022 por el consejo de la ANT, 16 veredas hacen parte de la ZRC que incluye 22.806 hectáreas de la localidad: San José, Nueva Granada, Concepción, Tunal Alto, Tunal Bajo, Lagunitas, Chorreras, La Unión, Santo Domingo, San Juan, Las Vegas, Capitolio, El Toldo, San Antonio, Las Sopas y Las Ánimas.
Güejar-Cafre, Meta	Está ubicada en el municipio de Puerto Rico, con una extensión de 33.614 hectáreas y comprende 15 veredas del territorio. Esta zona hace parte del área de manejo especial del Parque Nacional Natural la Macarena para permitir el control de la frontera agrícola y protección ambiental.
Losada – Guayabero, Meta	Está ubicada entre los municipios Uribe y La Macarena, cuenta con un área de 163.735 hectáreas. Fue aprobada en el 2022 y beneficia a más de 10 mil personas. Esta ZRC tiene como objetivo cumplir una función amortiguadora de los Parques Naturales Tinigua y Cordillera de los Picachos.
Guaviare	Está ubicada en los municipios de Calamar, El Retorno y San José del Guaviare con una extensión aproximada de 445.969 hectáreas.

Fuente: Agencia Nacional de Tierras (2023)

5.3.4 Áreas de valor arqueológico

Los sitios de valor arqueológico son de gran importancia para conocer parte de la historia y la cultura de antiguos pobladores de los diferentes territorios. En Colombia se establecen varios lugares con valor arqueológico que revelan aspectos religiosos, económicos, culturales, políticos y sociales. Muchos de estos sitios muestran la existencia de cazadores, recolectores, pescadores y agricultores como también se puede conocer arquitectura, tumbas, herramientas de trabajo u otros objetos determinantes para la vida de estos pobladores (Medrano Acosta, 2019).

En Colombia, la riqueza y diversidad de los sitios arqueológicos reflejan la historia de las numerosas civilizaciones que han habitado el territorio a lo largo de milenios. Desde las antiguas culturas precolombinas como los Muiscas, Tayronas, Quimbayas y San Agustín, hasta las sociedades prehispánicas como la cultura Calima, Tierradentro y Tolima, permitiendo adentrarse en el pasado ancestral del país. Estas culturas y lugares llenos de elementos significativos como, por ejemplo, dibujos grabados en piedra (petroglifos), metales modificados (orfebrería), herramientas elaboradas en piedra (líticos), cerámica (alfarería), textiles, entre otros elementos que nos demuestran la ocupación prehispánica del territorio colombiano y contribuyen a la reconstrucción del pasado nacional (ICANH, 2021).

El registro de sitios arqueológicos por parte del Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH), tiene como propósitos poner en conocimiento la variedad y diferencia en las formas de poblamiento y actividades que desarrollaron las sociedades pasadas de Colombia. Así mismo dar un marco de referencia arqueológico de las distintas áreas del territorio para formulación de proyectos de investigación, planes de ordenamiento territorial o proyectos de infraestructura.

Los sitios arqueológicos que se establecen en el área de la cuenca VRO se ubican en la región de llanos orientales siendo (Meta, Casanare, Guaviare, Arauca y Vichada) donde se registraron 107 sitios arqueológicos, como también en el departamento de Cundinamarca se establecieron 147 sitios arqueológicos (ICANH, 2021).

En la **Tabla 20** se describen algunos de los sitios arqueológicos que se encuentran dentro de la VRO.

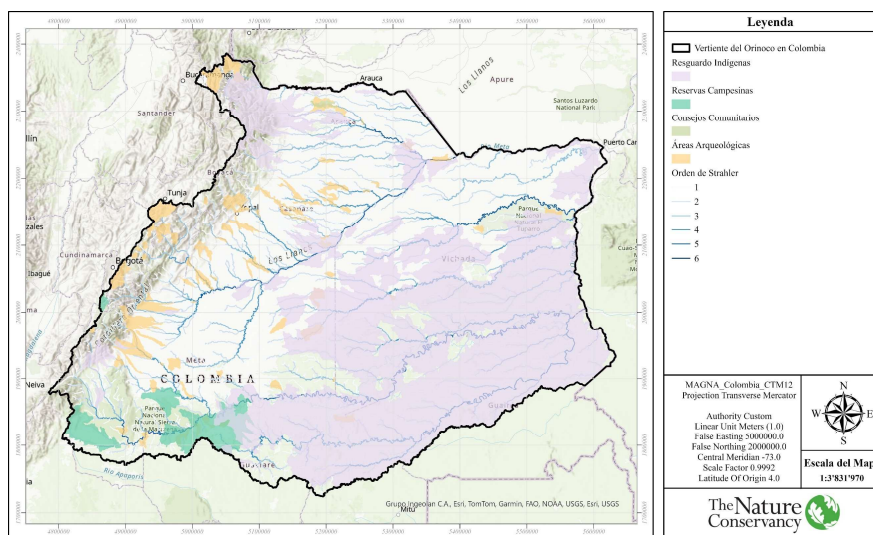
Tabla 20. Descripción de sitios arqueológicos presentes en la VRO

Ubicación	Nombre	Descripción
Puerto Carreño, Vichada	Iculi - Cerro Iculi o Peinillas	Esqueletos humanos desarticulados y sin ajuar funerario, ubicados a lo largo de un estrecho corredor debajo de una enorme roca y en un número superior a ocho individuos. Cráneos dolicocefalos. Gran número de pictografías en tinte rojo donde sobresalen motivos naturalistas, como lagartijas, representaciones antropomorfas, soles y otros diseños de tipo abstracto
El Calvario, Meta	Camino El Calvario a Monfort	Hachas y cinceles elaboradas sobre roca silicea. Fragmentos cerámicos de tipología Muisca
Sabanalarga, Casanare	El guadal -Palmichal	Petroglifo, llamados “La piedra de los ancestros”, encontrados en el 2020.

Fuente: ICANH (2021)

La **Figura 30** genera una representación detallada de la distribución geográfica de los resguardos indígenas, reservas campesinas, consejos comunitarios y áreas arqueológicas dentro de la VRO. Destacando la importancia de estas comunidades en relación con el territorio y la conservación. Los resguardos indígenas como las zonas de reservas campesinas reflejan la lucha y el compromiso por proteger sus territorios y modos de vida tradicionales y ancestrales. Por el lado de los consejos comunitarios buscando preservar la cultura de las comunidades afrodescendientes, como último se ubican los sitios de interés arqueológico resaltando la importancia histórica y cultural de cada territorio. Resumiendo, así, la importancia de conservación y protección del territorio y su patrimonio.

Figura 30. Distribución áreas culturales en la VRO



5.4 Áreas de valor espiritual

En cuanto a las áreas de valor espiritual, se hizo la aproximación con los sitios considerados sagrados para las diferentes comunidades indígenas presentes en la VRO. Esto debido a que los sitios sagrados suelen ser portadores de energía espiritual que sirve como puntos de conexión con lo trascendental, o sagrado. Igualmente, estos lugares cuentan con historia de tradiciones culturales y espirituales que se transmiten por todas las generaciones, siendo el escenario para diferentes rituales, ceremonias que fortalecen los lazos de conexión. Siendo los sitios sagrados una manifestación tangible de la espiritualidad y la identidad cultural de las comunidades, en este caso los indígenas. Es importante resaltar que el

proceso para este valor de conservación es un supuesto ya que la información sobre lugares o áreas de valor espiritual disponible para la zona VRO es limitada y de difícil acceso. Por lo tanto, es esencial llevar a cabo investigación para caracterizar adecuadamente estas áreas. Esto no solo para preservar el patrimonio cultural sino también para comprender las creencias y prácticas espirituales de las comunidades locales que conllevan también a la conservación de la biodiversidad, generando una gestión más completa del territorio.

Los sitios sagrados para las comunidades indígenas presentes en la VRO se caracterizan por ser raudales y madre viejas (lagunas) debido a que albergan una amplia biodiversidad al ser fuente crucial de peces, recursos naturales, plantas medicinales que son esenciales para su subsistencia y bienestar. Así mismo, estos lugares tienen un amplio significado cultural y religioso donde se vinculan a mitos y leyendas ancestrales como también son utilizados para la realización de ceremonias y rituales que fortalecen la identidad comunitaria, además estas comunidades poseen un conocimiento arraigado sobre la gestión de los recursos naturales y la preservación de la biodiversidad (Saade and Páramo, 2018). Por esta razón los raudales y madre viejas son prioritarios en los esfuerzos de conservación ya que representan tradiciones ancestrales, recursos vitales entre otros.

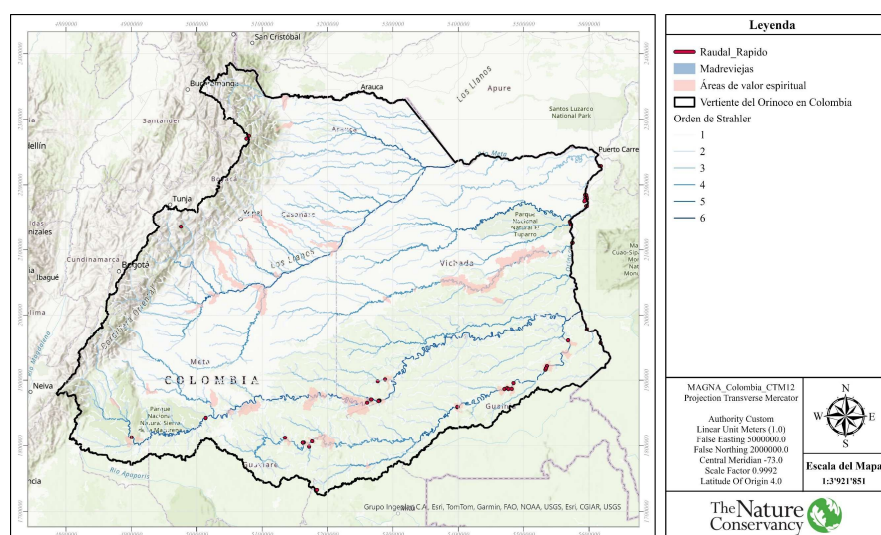
En la cosmovisión de la etnia **Piapoco**, el término "Chatiri" representa al Padre del Agua (DANE et al., 2010), considerado como el guardián de las fuentes hídricas que son veneradas como sitios sagrados. Estos lugares no solo proveen alimento, sino que también son fundamentales para rituales y prácticas tradicionales. Sin embargo, la violencia ha irrumpido en su territorio, afectando gravemente a la comunidad. Se han registrado actos destructivos como la perforación y explosión bajo los ríos, que han perturbado el hábitat de los peces y amenazan la seguridad alimentaria de la comunidad. Además, la violencia ha llegado al punto de destruir el cementerio ancestral perforando el río Meta en este caso, un acto que afecta la conexión espiritual y cultural de la comunidad con sus antepasados.

Para la etnia **Puinave** en el resguardo Cocoro. Mavicure, Raudal Alto y Cerro Caballo (Ramírez et al., 2005) son mencionados como sitios que evocan los orígenes de la comunidad, destacando su importancia espiritual y cultural. Asimismo, se hace referencia al centro del mundo ubicado en el Raudal Uapui donde se encuentra la figura que representa el hogar y las huellas de Kuwai. Este lugar, marcado por los raudales Uapui y Yandú se considera el centro del mundo reflejando la conexión espiritual de la comunidad con la tierra.

Por el lado de los **Sikuani** muestran una profunda veneración por sus sitios sagrados, que abarcan desde sabanas y montañas hasta lagunas, ríos y morichales ya que de ahí se fortalece la energía que posee el médico tradicional para manejar la relación de armonización y evitar enfermedades que producen las energías negativas de esos lugares que se manifiestan cuando el hombre desobedece las normas culturales por tradición. La creencia en los "ainawi", los espíritus de fortaleza, refuerzan esta relación con la naturaleza, utilizándolos como mediadores para comunicarse con el entorno natural (Ministerio del Interior & ONIC, 2013).

Como resultado de la recopilación de información por parte de los sitios sagrados para las comunidades indígenas partiendo de los planes de vida por comunidad y debido a la ausencia de información espacialmente explícita sobre los sitios de valor espiritual, se tomaron los raudales y madre viejas registradas en la cartografía IGAC 1:100.000, esto se visualiza en la **Figura 31**, evidenciando que la existencia de áreas de valor espiritual se sitúan en los ríos Meta, Vichada y Guaviare, donde es el asentamiento de grandes resguardos indígenas.

Figura 31. Distribución áreas espirituales – sitios sagrados en la VRO



6 Identificación KEAs, amenazas y sus fuentes

Los atributos ecológicos clave (**Kea Ecological Attributes**, en inglés), son características esenciales para el mantenimiento de los ecosistemas de agua dulce y, por tanto, para los valores de conservación (Higgins et al., 2021). Las investigaciones existentes han identificado que el régimen hidrológico, el transporte de sedimentos, la calidad del agua, la estructura física y la conectividad como los principales determinantes del hábitat físico y las comunidades bióticas de los ecosistemas de agua dulce (Castello et al., 2013; Higgins et al., 2021; N. LeRoy Poff et al., 1997; Zeiringer et al., 2018). Estas características también juegan un papel crucial en la dinámica social de las comunidades que dependen de estos ecosistemas para su subsistencia (Higgins et al., 2021). Por lo tanto, se han seleccionado estos KEAs mencionados como los elementos clave para la creación del portafolio de conservación en la VRO.

De acuerdo con Higgins et al. (2021), las amenazas a los ecosistemas de agua dulce hacen referencia a los peligros existente de origen natural o causado, o inducido por la acción humana que puede llegar a impactar el funcionamiento de los KEAs. La identificación de amenazas en este caso para la VRO se presenta y se explican con el fin de vincular los KEAs para la planificación de estrategias o métodos para tomar acciones de conservación.

La vinculación de los KEAs, las amenazas y las fuentes de amenazas para la planificación estratégica puede llevarse a cabo utilizando métodos y herramientas ampliamente aplicados a la planificación de acciones de conservación. Comprender las relaciones entre los valores, los KEA que los sustentan y los tipos y fuentes de amenazas proporciona a los gobiernos, comunidades y partes interesadas una estructura para definir mecanismos adecuados y pragmáticos para hacer frente a esas amenazas. Estos mecanismos pueden basarse en los legalmente vinculantes como lo son: reglamentos, legislación, adquisición de derechos exigibles sobre los recursos naturales entre otros. Otra opción son los acuerdos que no son jurídicamente vinculantes que pueden establecerse por normas comunitarias y culturales (Higgins et al., 2021).

En los últimos años, la VRO se ha convertido en uno de los polos de desarrollo más importantes del país, con un crecimiento acelerado de las actividades agroindustriales, pecuarias y extractivas de petróleo y gas, que tiende a acelerarse en los próximos años (WWF et al., 2016). La VRO es una de las grandes apuestas del Gobierno nacional para impulsar el desarrollo y el crecimiento económico del país y es uno

de los escenarios para la puesta en marcha de los planes para el posconflicto (Departamento Nacional de Planeación, 2016). En línea con esto, en la **Tabla 21** se sintetiza para cada KEA, las principales amenazas y sus fuentes para la VRO.

Tabla 21. KEA, amenazas y fuentes para la VRO

AEC	Amenazas	Fuentes de amenaza consideradas
Régimen hidrológico	Cambio climático Cambios de cobertura / uso del suelo Cambios en demandas de agua	Cambios en precipitación y temperatura Agrícola Pecuario Minero Hidrocarburos Urbanización / Demanda doméstica Deforestación
Flujo de sedimentos	Cambio climático Cambios de cobertura / uso del suelo	Cambios en precipitación y temperatura Agrícola Pecuario Minero Hidrocarburos Urbanización / Demanda doméstica Deforestación
Calidad del agua	Contaminación	Agrícola Pecuario Minero Hidrocarburos Urbanización Deforestación
Estructura física	Cambios de cobertura / uso del suelo Cambios de estructura de paisaje	Agricultura Ganadería Infraestructura Deforestación Urbanización Incendios
Conectividad	Barreras de conectividad	Infraestructura

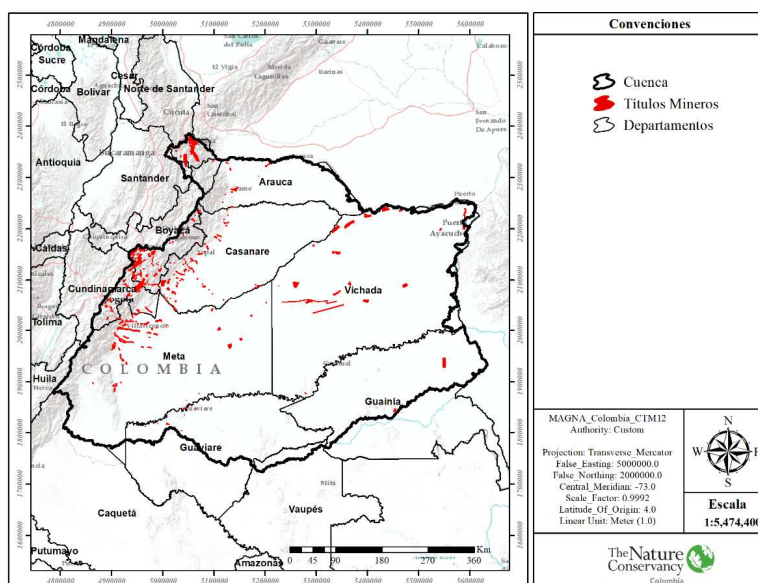
A continuación, se desglosan las amenazas identificadas.

6.1 Minería

La actividad minera tiene una alta participación dentro de la VRO. La mayor participación la tiene el departamento de Boyacá, Casanare y Meta, centrándose en los bosques de las cuencas de los ríos Inírida, Ventuari y Caura. La extracción se da para materiales de construcción, oro, esmeralda, coltán, carbón entre otros (Aguilar Londoño et al., 2021). La problemática de esta actividad se relaciona a la deforestación causada para cumplir con la extracción, conllevando también a la erosión de suelos, contaminación de aguas por el uso de mercurio (WWF Colombia and Foro Nacional por Colombia, 2017) y otras sustancias contaminantes para la extracción de oro y otros minerales.

El mercurio es un elemento químico circundante con gran facilidad de bioacumulación y biomagnificación dentro de la cadena trófica, lo que aumenta sus efectos y el riesgo de intoxicación y contaminación por contacto con el mismo (Pinzón and Fajardo Gómez, 2018). Esta actividad minera como se viene desarrollando en la cuenca genera afectación en cuanto a la disponibilidad de servicios ecosistémicos, pérdidas directas sobre la biodiversidad, cambios en los cursos de agua y contaminación de fuentes hídricas presentes en la cuenca. Los títulos mineros presentes en la cuenca se aprecian en la **Figura 32**.

Figura 32. Títulos mineros presentes en la VRO



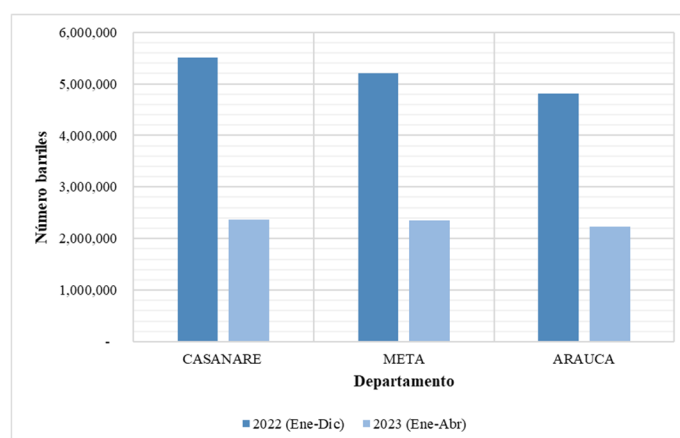
6.2 Exploración y explotación de petróleo y gas

En los departamentos de la VRO, la producción de petróleo y gas ha ido en aumento año a año, como se evidenció en el 2022 se tuvo un aumento de 6 millones de barriles con respecto al 2021, igualmente un análisis al 2023 ha evidenciado el aumento en la producción diaria en hasta 20 mil barriles con respecto al año 2022. Teniendo en cuenta que las reservas a nivel regional se encuentran en el departamento del Meta con un 54% de las reservas, seguido del departamento de Casanare con el 16%, Santander 7% y Arauca con un 5%(Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2023).

En cuanto a gas, las principales reservas se encuentran en el departamento de Casanare con un 49%(Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2023). Estas actividades de exploración y explotación se presentan en gran mayoría en territorio dentro de la VRO generando impactos frente a afectación de las condiciones naturales del suelo e igualmente a los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos, cambio en coberturas para construcción de infraestructura correspondiente a las actividades de producción.

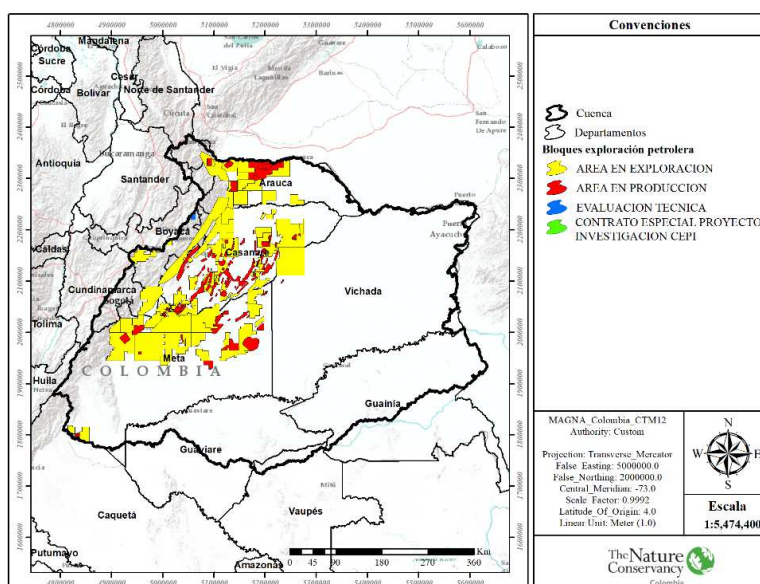
La **Figura 33** muestra el panorama actual al 2023 de producción de barriles con corte a abril, en comparación con el año 2022 con corte a diciembre por departamento presente en la VRO que cuenta con actividades de explotación de hidrocarburos. Por otro lado, la **Figura 34** relaciona los bloques de exploración y explotación petrolera presentes en la cuenca actualmente.

Figura 33. Número de barriles producidos por departamento entre el año 2022 y 2023



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos (2022)

Figura 34. Bloques de exploración petrolera en la VRO



6.3 Ampliación frontera agrícola y pecuaria

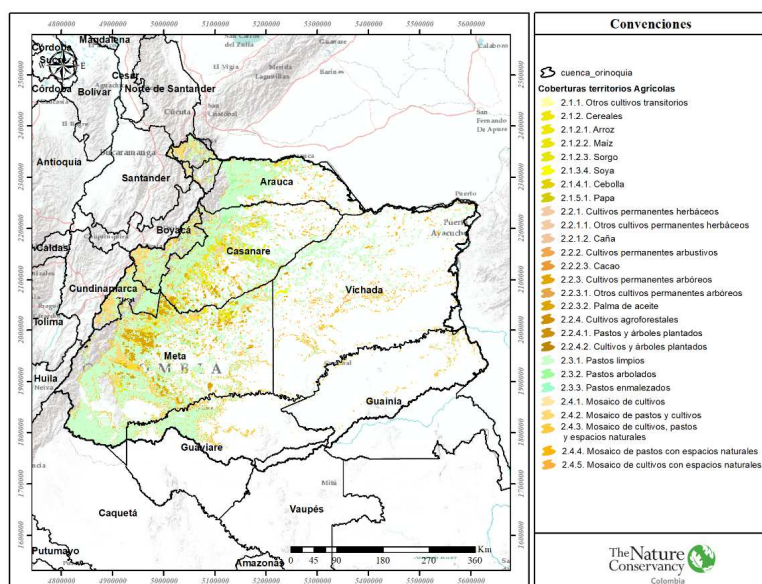
En cuanto a actividades agrícolas y pecuarias, lo que corresponde a la VRO, los departamentos de Meta, Casanare, Arauca y Vichada lideran la producción de arroz, palma, maíz, ganadería entre otros productos agropecuarios. Según el plan maestro de la Orinoquía que se lanzó desde el Gobierno Nacional, se tiene como estrategia la ampliación de la frontera agrícola en un mediano y largo plazo, actualmente cerca de 700,000 hectáreas están sembradas pero la estrategia busca que en total sean 3.3 millones de hectáreas dedicadas a la agricultura teniendo como visión que la VRO se convierta en potencia agrícola en cuanto a cultivo de plátano, cacao, soya, palma de aceite, arroz y maíz (Departamento Nacional de Planeación et al., 2022).

Sin embargo, los ecosistemas naturales de la cuenca se vienen transformando de forma rápida siendo más de 200,000 hectáreas por año de sistemas productivos y extractivos poco sostenibles generando pérdidas

ambientales y sociales por cambio en uso del suelo, deforestación, afectación en múltiples ecosistemas y su biodiversidad por uso indiscriminado de agroquímicos (Portocarrero Aya and Lee, 2021).

Como se observa en la **Figura 35** se relacionan las coberturas de territorios agrícolas que en su mayoría ocupan la VRO con territorios de pastos, cultivos agroforestales, cultivos de diversos cereales entre otros.

Figura 35. Coberturas territorios agrícolas de la VRO



El espacio utilizado para ganadería en la VRO se divide en sabanas naturales y pastos introducidos en terrenos cultivados para la alimentación bovina. Por otra parte, en las sábanas se aprovecha la oferta natural del medio que no genera presiones de transformación y favorece la conservación de la biodiversidad, estas últimas son menos rentables y productivas por lo que la transformación de las sábanas en potreros se genera de manera rápida siendo una amenaza latente por la transformación de ecosistemas (WWF COLOMBIA et al., 2020).

Estos tres departamentos albergan más de un millón de animales, siendo, Casanare, Meta y Arauca para un total de 5,770,120 cabezas en los siete departamentos de la VRO. Sin embargo, presenta una distribución desigual del ganado y con un modelo extensivo generando cambios en coberturas y alteración de ecosistemas (Universidad de los Andes - Centro de Estudios de la Orinoquía and García, 2019). Según el plan maestro de la Orinoquía en un largo plazo se busca hacer frente a estos impactos reduciendo las cabezas de ganado por hectárea e igualmente concentrarlo en zonas aptas sin causar tanta afectación y alteración de los ecosistemas debido a las actividades zonas productivas (Departamento Nacional de Planeación et al., 2022).

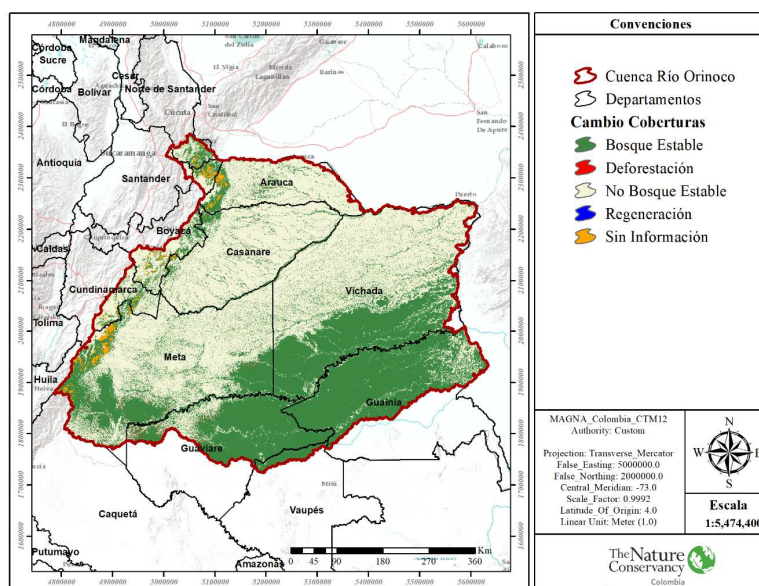
La pérdida de ecosistemas intactos en la VRO a cuenta de la expansión agrícola es inevitable, el desarrollo de actividades productivas debe planificarse para evitar impactos sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. La ordenación del territorio haciendo uso óptimo de la asignación de zonas de ganaderas y de cultivos, puede mejorar los resultados en cuanto a la persistencia de las especies, la conservación de los ecosistemas, el secuestro de carbono, el suministro de agua y el valor de la producción agrícola (Williams, 2020).

6.4 Deforestación

El 70% de la deforestación se concentra en 4 departamentos de la VRO: Meta, Caquetá, Guaviare y Putumayo. Las causas de esta deforestación se deben a actividades de ganadería extensiva, infraestructura vial, ampliación de la frontera agrícola, extracción ilícita de minerales. En el 2022 se incrementaron al menos 50,400 hectáreas en deforestación, concentrándose el 29% en el departamento del Meta, principalmente en el municipio de La Macarena, donde se perdieron 18,578 hectáreas de bosque en el Parque Nacional Natural Tinigua (Rodríguez, 2022)

La **Figura 36** clasifica la VRO según el cambio de coberturas que se ha venido presentando en los últimos años a nivel espacial, clasificándose en 4 categorías, bosque estable, deforestación, no bosque estable, regeneración.

Figura 36. Mapa de cambio de coberturas para la VRO



6.5 Contaminación fuentes de agua dulce

La contaminación de fuentes hídricas que se presentan en la VRO es debida en gran parte a las actividades de agricultura y ganadería extensiva que se llevan a cabo. Estas actividades vierten grandes cantidades de agroquímicos, plaguicidas, nitratos, materia orgánica, sedimentos y sales en los cuerpos hídricos (FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2018). Por el lado de la minería, genera contaminación de cuerpos de agua debido al mercurio que se usa para la extracción de oro y este genera un riesgo de intoxicación y riesgo tanto para la salud humana como para la fauna por su gran facilidad de bioacumulación y biomagnificación (Pinzón and Fajardo Gómez, 2018).

Es importante resaltar que es más significativa la contaminación por actividades productivas, en gran medida por la materia orgánica de la ganadería a la contaminación derivada por los centros poblados. Lo que corresponde al tratamiento de aguas por parte de los centros poblados, es escasa, esto debido a que solo el 48.2% del total de municipios cuentan con planta de tratamiento de aguas residuales. La distribución por departamentos se presenta de la siguiente manera, Cundinamarca con un total de 137 plantas, Antioquia (90), Boyacá (39), Cauca (37) y Tolima (36) (Loaiza Venegas, 2018). La no presencia o existencia de un método de tratamiento para las aguas generadas por las áreas urbanas y comunidades presentes en la cuenca, genera una alta contaminación a las fuentes hídricas con elevadas cargas de materia

orgánica, metales, entre otros que pueden llevar a alteraciones e impactos a la biodiversidad y a la provisión de los servicios ecosistémicos por baja calidad en cuanto al recurso hídrico.

6.6 Cambio climático

El cambio climático en cuanto al recurso hídrico de la VRO puede provocar cambios en el régimen hidrológico reflejados en excesos de humedad o sequías extremas cuyos impactos tienen que ver con la disponibilidad en cuanto a oferta y demanda de recurso que a su vez afectan las actividades productivas como pérdidas de cultivos, reducción de coberturas para ganadería y agricultura, inundaciones, alteraciones en los ecosistemas entre otros (CORMACARENA et al., 2017).

Los cambios en los patrones de temperatura y precipitación pueden generar as su vez cambios en la distribución geográfica de las especies, generando migraciones para la adaptación a condiciones climáticas aptas para su desarrollo (CORMACARENA et al., 2017). Debido a esta posible problemática es importante la conservación de ecosistemas estratégicos para garantizar el equilibrio de los ecosistemas ante los posibles cambios y alteraciones climáticas.

En cuanto a actividades de minería e hidrocarburos, al haber una posible alteración en las temperaturas se podría generar un aumento en la demanda de energía y a su vez la oferta se enfrentaría a mayores ineficiencias derivadas a la baja adaptación de condiciones climáticas, afectando así la producción e ingresos del sector energético, incluyendo el minero (CORMACARENA et al., 2017).

7 Indicadores de atributos para grupos de agua dulce

De acuerdo con Nogales et al. (2023), para determinar qué ecosistemas de agua dulce deben ser objeto de conservación, es fundamental comenzar por identificar la cantidad de ecosistemas de agua dulce presentes en toda la VRO. Para lograrlo, se utilizan una serie de indicadores denominados "indicadores de atributos", los cuales son esencialmente características que describen cómo es un ecosistema, pero desde la perspectiva de los KEAs, esto de acuerdo con las pautas establecidas por Higgins et al. (2021).

Dado que los KEAs no abarcan por completo todas las características que distinguen un ecosistema de agua dulce de otro (en el sentido estricto de la palabra), en el contexto de este estudio se utiliza el concepto de "grupo de agua dulce" propuesto por Nogales et al. (2023).

“Un grupo de agua dulce es el conjunto de unidades de planeación, o microcuencas, que comparten características similares en términos de KEAs. En este sentido, los grupos de agua dulce pueden ser entendidos como la colección de hábitats existentes dentro de una cuenca”

Lo que permite este concepto es categorizar, que áreas de la cuenca son diferentes en términos de características esenciales para el mantenimiento de los ecosistemas de agua dulce y, por tanto, para los valores de conservación. En este orden de ideas, a continuación, se detallan los indicadores de atributo por KEAs, que se seleccionaron para la identificación de los grupos de agua dulce en la VRO.

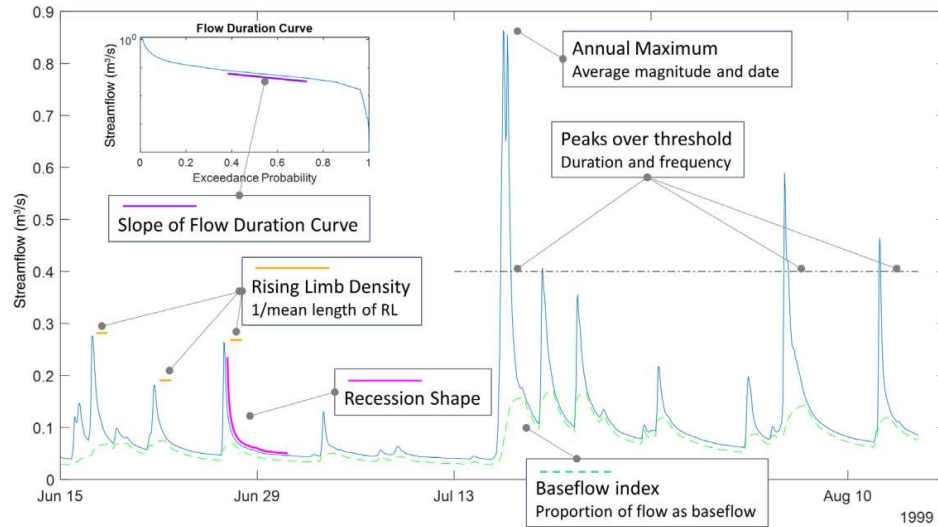
7.1 Régimen hidrológico

El régimen hidrológico se define mediante cinco componentes esenciales: magnitud, frecuencia, duración, tiempo y tasa de cambio (Higgins et al., 2021; McMillan, 2020; N LeRoy Poff et al., 1997; Rosenberg et al., 2000). De acuerdo con McMillan (2021) las métricas que cuantifican estas dinámicas del régimen hidrológico, se conocen como firmas hidrológicas (ver **Figura 37**).

Las firmas hidrológicas generalmente apuntan a un componente de la respuesta de la cuenca y se pueden utilizar para identificar procesos de generación de escorrentía, para la clasificación de cuencas y para detectar alteraciones hidrológicas como la urbanización (Gnann et al., 2021).



Figura 37. Ejemplos de firmas hidrológicas de uso común calculadas como métricas de las series temporales de caudales



Fuente: McMillan (2021)

Gnann et al. (2021) ha consolidado para los cinco componentes esenciales que describen el régimen hidrológico, las firmas que permiten caracterizarlo (ver **Tabla 22**).

Tabla 22. Firmas hidrológicas que describen el régimen de flujo

	Magnitude	Frequency	Duration	Timing	Rate of Change
Basic Set	Mean flow, 5th and 95th flow percentiles, mean monthly flow, 7-day minimum flow, BFI, coefficient of variation at flow timestep	High, low, and zero flow frequency	High, low, and zero flow duration	Mean half flow date, mean half flow interval	Lag-1 autocorrelation, slope of FDC, exponential recession constant
Addor	Mean flow, 5th and 95th flow percentiles, runoff ratio, streamflow-precipitation elasticity, BFI	High, low, and zero flow frequency	High and low flow duration	Mean half flow date	Slope of FDC
Sawicz	Runoff ratio, BFI, streamflow-precipitation elasticity	Snow day ratio			Slope of FDC, rising limb density
Euser	Slope of distribution of peaks, low-flow ^a slope of distribution of peaks				FDC, low-flow ^a FDC, high-flow ^a FDC, lag-1 autocorrelation, low-flow ^a lag-1 autocorrelation, rising limb density

BFI denotes the baseflow index, FDC denotes the flow duration curve.

^a These signatures are applied to different parts of the time series, e.g. the low flow period (May to September) or the high flow period (November to April).

Fuente: Gnann et al. (2021)

Para el caso de la VRO, se consideraron las siguientes firmas hidrológicas en cada componente:

Magnitud - Caudal promedio anual: este se calcula a través de las series de tiempo de caudal para cada estación determinando. Esto se expresa en la siguiente ecuación:

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum Q_i$$

Donde $\bar{Q}$ es el caudal promedio anual, Q_i es valor de caudal en un tiempo i y n es el número de datos total.

Duración - Duración de los caudales altos (en meses): Se estima como el número de meses con caudales por encima de percentil 5 de la curva de duración de caudales. Con esto, se realiza el conteo de meses para los cuales este caudal es igualado o excedido, es decir

$$\operatorname{argmax}_Q(Q_x \geq Q_5)$$

Donde Q_x alude al caudal analizado y Q_5 corresponde al valor del caudal relacionado con el percentil 5 de la CDC.

Frecuencia - Frecuencia de caudales máximos: Se estima contando la cantidad de veces que se presenta el caudal máximo al año dentro de la serie de caudales. Dependiendo de la zona del país, se generarán 1 o 2 picos, asociados a la ZCIT. Se calcula mediante las frecuencias máximas de la transformada de Fourier.

Tasa de cambio - Pendiente la CDC (S_{CDC}): Se cálculo entre los percentiles Q_{33} y Q_{66} , lo que permite entender la variabilidad en el régimen hidrológico. Un valor alto de pendiente indica alta variabilidad en los caudales. Por su parte, una baja pendiente indica baja variabilidad. Lo anterior se expresa en la siguiente ecuación:

$$S_{CDC} = \frac{Q_{33} - Q_{66}}{t_{33} - t_{66}}$$

Donde Q_{33} y Q_{66} son los caudales correspondientes a los percentiles 33 y 66 respectivamente y t_{33} y t_{66} son las frecuencias de los percentiles correspondientes.

Tiempo - Tiempo como el semestre de medio flujo (meses): Este, está definido como el semestre del año donde se alcanza el caudal medio. Se estima el punto dentro de la serie temporal donde se iguala o excede $\bar{Q}$.

7.2 Flujo de sedimentos

El flujo de sedimentos en un río se encuentra condicionado por la cantidad de sedimentos que es capaz de movilizar (Schmitt et al., 2016). En el contexto para la VRO, de acuerdo con la propuesta de Nogales et al. (2023) se selecciona la capacidad de transporte de sedimentos en condiciones de banca llena como indicador de atributo de este KEA, ya que esté determinan en gran medida la morfología del río y por tanto la disponibilidad de hábitats para las especies que lo habitan (Schmitt et al., 2016).

7.3 Calidad del agua

La composición química de las aguas determina muchas de las propiedades ecológicas en los ecosistemas (Ríos-Villamizar et al., 2020). Para la cuenca del Orinoco, se han definido tres tipologías de aguas (Maco-García, 2006):

- **Ríos de aguas negras:** Describe ríos que tienen aguas oscuras producto de la alta concentración de materia orgánica en descomposición (alto contenido de sustancias húmicas y ácidos fúlvicos) y minerales disueltos en el agua. Por lo general se originan en dentro del bosque húmedo

- **Ríos de aguas claras:** Describen ríos que generalmente tienen una baja concentración de sedimentos y de nutrientes disueltos en el agua.
- **Ríos de aguas blancas:** Presentan aguas lodosas, turbias, debido al alto contenido de arena, arcilla y limo en suspensión, que proporcionan una coloración marrón claro a sus aguas. Por lo general son de origen Andino (Cordillera de los Andes).

De acuerdo con Maco-García (2006), cada tipología refleja características físicas, químicas y biológicas particulares de unos ambientes. En este sentido, se consideró esta clasificación como el indicador de atributo para este KEA.

7.4 Estructura física

Tomando en cuenta la información que aportan sobre la productividad biótica (Venarsky et al., 2018) y los hábitats que están disponible en un ecosistema de agua dulce (Buffington and Montgomery, 2022; Flores et al., 2006), se seleccionó los siguientes indicadores de atributo para evaluar la estructura física:

Configuración morfológica del río:

Dependiendo el grado de restricción de movimiento lateral que tenga un río, este puede categorizarse como confinado o no confinado (Beechie et al., 2006).

- **Ríos confinados:** Corresponden a ríos donde las paredes del canal restringen su movimiento lateral, por lo general tienen canal más estrecho y profundo, y su curso de agua está confinado dentro de límites geográficos definidos, lo que limita su capacidad para moverse y cambiar de curso de manera significativa.
- **Ríos no confinados:** Corresponden a ríos fluyen a través de llanuras de inundación amplias y abiertas, donde las restricciones geográficas son mínimas. Estos ríos tienen más espacio para expandirse y moverse lateralmente durante las crecidas. Sus cauces pueden ser más anchos y, en general, tienen un mayor potencial para cambiar de curso con el tiempo debido a la deposición de sedimentos y cambios en la topografía circundante.

Potencia específica de la corriente:

La capacidad de transporte de sedimentos a lo largo de una corriente está relacionada con la disipación de energía por unidad de área por tiempo o potencia específica de la corriente en un tramo de río. Dependiendo de este parámetro, los ríos pueden estar limitados por capacidad o por suministro (Flores et al., 2006).

- **Ríos limitados por capacidad:** corresponde a ríos que presentan un alto suministro de sedimentos, pero una baja capacidad para movilizarlos (con respecto al suministro). Por lo general en este tipo de ríos los sedimentos tienden a acumularse en el lecho del Río.
- **Ríos limitados por suministro:** corresponde a ríos que presentan un bajo suministro de sedimentos, pero una alta capacidad de transporte (con respecto al suministro). Por lo general en este tipo de ríos tienden a no tener barras de sedimentos sobre su cauce.

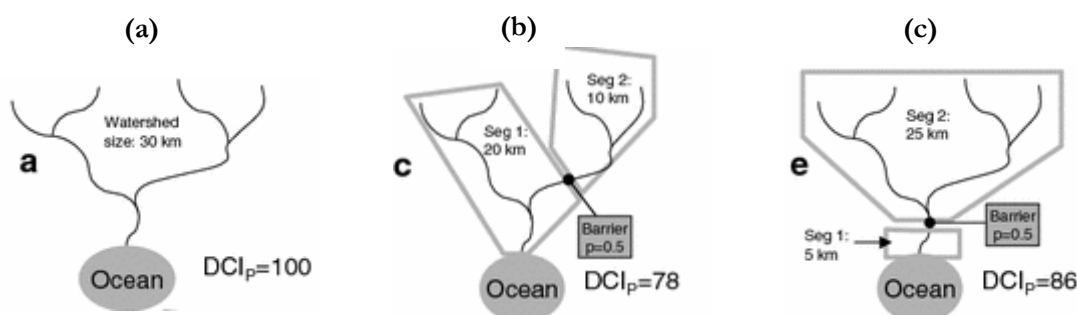
7.5 Conectividad

La conectividad representa un atributo esencial en los ecosistemas de agua dulce (Herrera-Pérez et al., 2019; Saura et al., 2017), en particular para peces que efectúan movimientos migratorios en la VRO, como es el caso del *Brachyplatystoma filamentosum* (Valentón), *Calophysus macropterus* (Mota) y la Zungaro zungaro (Amarillo) (Zapata and Usma, 2013). Para este KEA se selección como indicador de atributo el

índice de Conectividad Dendrítica (*DCI*), propuesto Cote et al. (2009). Este indicador evalúa la conectividad en términos de probabilidad de coincidencia, es decir, la probabilidad de que los peces puedan moverse entre dos puntos elegidos al azar en una red fluvial. Por lo tanto, la conectividad depende de cuántas barreras haya entre dos puntos y de la probabilidad de que los peces puedan cruzar dichas barreras en la dirección aguas arriba como aguas abajo.

En un sistema sin barreras, existe una conectividad completa de la red fluvial, por lo que el *DCI* tiene un valor máximo de 100 (ver **Figura 38a**). La introducción de una sola barrera crea dos secciones de corriente (ver **Figura 38b**), y el *DCI* se basa en los tamaños (longitudes totales del canal) de las secciones resultantes y la posibilidad de atravesar (concepto de “permeabilidad”) la barrera en ambas direcciones, aguas arriba y aguas abajo (en este caso, el producto de las dos permeabilidades = 0.5). Cambiar la ubicación de la barrera (ver **Figura 38c**) para crear una mayor desigualdad en el tamaño de la sección de río da como resultado un sistema más conectado (*DCI* más alto) (Cote et al., 2009).

Figura 38. Representación esquemática de la variación del *DCI*



Fuente: Cote et al. (2009)

En principio, el *DCI* consta de dos componentes: el *DCI_p*, el cual mide la conectividad de las especies de peces residentes en el sistema fluvial, y el *DCI_d*, que mide la conectividad de los peces que migran desde el tallo principal del río hacia los afluentes de la cuenca. Para el caso particular del marco, se hará uso del componente *DCI_p*, el cual se nombra de aquí en adelante como *DCI*

Para el cálculo del *DCI* se divide el sistema fluvial en secciones según la ubicación de las barreras. Luego, se calculan los componentes en función de la probabilidad de movilidad entre las secciones expresada como (Shaad et al., 2018):

$$DCI = 100 * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{l_i}{L} \right) \left(\frac{l_j}{L} \right) \left(\prod_{m=1}^M p_m^u p_m^d \right) \right]$$

Donde *L* es la longitud total de la sección del río y (*l_i*, *l_j*) son las longitudes de las secciones *i* y *j*. *M* es el número total de barreras entre las secciones *i* y *j* (para *DCI_p*). *p_m^u* y *p_m^d* son la *transitabilidad* aguas arriba y aguas abajo, respectivamente, de la *m* – ésima barrera entre las secciones y la transitabilidad general de una barrera *p_m* = *p_m^u* * *p_m^d* (Shaad et al., 2018).

El *DCI* intenta dar cuenta de la modificación de cada barrera a la conectividad con un parámetro *p_m* que varía de 0 a 1, donde 0 indica que no hay paso de peces a través de la barrera, y 1 indica que no hay bloqueo (es decir, todos los peces que intentan pasar la barrera en cualquier dirección pueden hacerlo con éxito). Los valores de transitabilidad entre 0 y 1 indican pasadas de peces construidas de diferentes

eficiencias, con valores más altos que representan pasadas más eficientes que valores más bajos (Shaad et al., 2018).

Si la transitabilidad se evalúa como un resultado binario, esto es, una barrera cumple con los criterios de transitabilidad de los peces designados ($p_m^u = 1$ y $p_m^d = 1$) entonces el indicador se simplifica a:

$$DCI = 100 * \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i^2}{L^2} \right)$$

8 Indicadores de integridad

Según Flotemersch et al. (2016) la integridad es la capacidad de una cuenca para respaldar y mantener la amplia gama de procesos y funciones ecológicas esenciales para la sostenibilidad de la biodiversidad, así como para los recursos y servicios que la cuenca brinda a la sociedad. En este sentido, una cuenca que esté en buen estado de funcionamiento y saludable mostraría un alto grado de integridad, en contraposición a una cuenca poco saludable y que no cumpla adecuadamente sus funciones, la cual exhibiría una integridad baja.

De acuerdo con Flotemersch et al. (2016), para operativizar la integridad, este autor propone un enfoque basado en el uso de indicadores. En su propuesta, sugieren la definición de un indicador específico para cada proceso o función ecológica (en nuestro caso, los KEAs) que refleje su estado. Esto implica que cada indicador debe ser capaz de detectar los factores que se han identificado como estresores² para cada proceso o función (que en nuestro caso corresponden a las amenazas). Posteriormente, se construye un indicador compuesto que integra todos estos subindicadores, y este indicador compuesto es el que proporciona una medida de la integridad de la cuenca. El detalla del proceso de integración se presenta en el numeral 13.

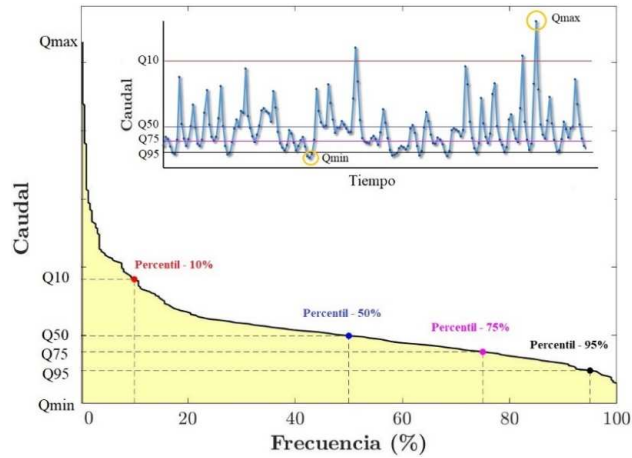
En línea con lo anterior, para cada KEA, se ha seleccionado un indicador de integridad los cuales son sensibles a las amenazas definidas en el numeral 6.

8.1 Régimen hidrológico y flujo de sedimentos

Una herramienta comúnmente utilizada para generar indicadores relacionado con el régimen hidrológico y el flujo de sedimentos es la curva de duración de caudales (CDC), ya que esta indica el porcentaje de tiempo en que cierto valor de caudal es igualado o excedido. Esta información puede interpretarse como la probabilidad de observar un caudal de cierta magnitud o mayor en el cuerpo de agua. Por ejemplo, el valor del caudal que se presenta en el percentil 10 (Q10), indica que en un 10% del tiempo se puede encontrar un caudal de esa magnitud (o superior) en el cuerpo de agua. Por lo general el Q10 es un caudal que se observa con baja frecuencia. Así pues, la CDC combina las características de flujo de una corriente en todo el rango de descarga, sin tener en cuenta la secuencia de ocurrencia. Si el período en el que se basa la CDC representa el caudal a largo plazo de una corriente, la CDC se puede usar para predecir la distribución de flujos futuros para estudios de generación eléctrica, suministro de agua y contaminación. Por lo anterior, la CDC es considerada como una herramienta útil para evaluar las características hidrológicas de las cuencas de drenaje (Herrmann and Bucksch, 2014). En la **Figura 39** se presenta la representación esquemática de la curva de duración de caudales.

² Hace referencia a aquellas perturbaciones de carácter antrópico que generan una degradación en los ecosistemas y por tanto en sus funciones. Un ejemplo de esto son los incendios forestales provocados por el hombre, el uso de la tierra agrícola, el área urbana o la densidad de las carreteras (Flotemersch et al., 2016).

Figura 39. Esquematización de la curva de duración de caudales



Para el caso de la VRO, se consideraron los indicadores propuestos por Nogales et al. (2023), los cuales se basan en el trabajo sobre alteraciones hidrológicas desarrollado por POFF et al. (2010). El indicador (I_{HR} o I_{SF}) evalúa la variación porcentual promedio de los i percentiles de la curva de duración (5, 10, 15, ..., 95) de caudales (Q) o de transporte de sedimentos (Qs), entre una condición histórica (h) y una con cambio climático (cc).

$$I_{HR} = \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{i,h} - Q_{i,cc}}{Q_{i,h}} \right|$$

$$I_{SF} = \sum_{i=1}^N \left| \frac{Qs_{i,h} - Qs_{i,cc}}{Qs_{i,h}} \right|$$

Donde N es la cantidad de percentil de curva de duración de caudales o de flujo de sedimentos. Un valor igual a cero en este indicador sugiere que la cuenca, bajo una condición de cambio climático, no experimentaría alteraciones significativas en lo que respecta al régimen hidrológico y al flujo de sedimentos, lo que se traduciría en una alta integridad. Por otro lado, valores superiores a cero indicarían una perturbación y, en consecuencia, una menor integridad.

8.2 Calidad del agua

Para calidad del agua, optamos por utilizar el índice de calidad de agua (I_{WQ}) de acuerdo con lo propuesto por Nogales et al. (2023), tomando en cuenta que el indicador de mayor uso a nivel del mundo para evaluar la condición de la calidad del agua (Orjuela and López, 2011; Akhtar et al., 2021). Matemáticamente, se expresa como:

$$I_{WQ} = \sum_{i=1}^N W_i \times S_i$$

Donde S_i es el valor de los subíndices para el determinante de calidad del agua i , W es el peso de ponderación y N es el número de determinante de calidad del agua considerados.

8.3 Estructura física

Para estructura física se optó por utilizar un indicador de mapeo de estresores (I_{PS}) de acuerdo con lo propuesto por Flotemersch et al. (2016) y Thornbrugh et al. (2018), pero considerando un método de agregación armónico (Juwana et al., 2012).

Cada S_j se normaliza utilizando el valor máximo registrado en la cuenca. En esta escala, 1 indica un alto nivel de estrés, mientras que 0 (en notación matemática) representa la ausencia de estrés. Para evaluar el impacto de cada estresor en la respuesta del ecosistema, la herramienta emplea una función de respuesta dependiendo de su resiliencia inherente a través de una función logística que calcula su integridad g_j asociada, así:

$$g_j = \frac{a_j}{1 + \exp(-b(S_j - c))}$$
$$a = 1$$
$$b_j = -\frac{1}{\min(S_j) + c_j} \ln\left(\frac{1}{0.999} - 1\right)$$
$$c_j = \frac{\max(S_j)}{2}$$

Los valores a_j , b_j y c_j son parámetros de calibración de la función logística. Finalmente, el índice de integridad I_{EF} se calcula por medio de la ecuación de promedio armónico:

$$I_{PS} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{\sum_{i=1}^n w_i / g_i}$$

Donde w_i indica el valor de ponderación asociado a cada estresor. Dado que se asume que todos tienen la misma importancia, $w_i = 1/n$, donde n es la cantidad de estresores analizados.

8.4 Conectividad

En lo que respecta a conectividad, se tomó el indicador de conectividad longitudinal (I_C) propuesto por Nogales et al. (2023), el cual relaciona la longitud (L_A) del trayecto más corto que conecta una microcuenca con la desembocadura de la cuenca de análisis sin considerar la fragmentación por barreras; y la longitud (L_B) del trayecto más corto conectado que permita llegar a la desembocadura de la cuenca de análisis, considerando las barreras.

$$I_C = \frac{L_B}{L_A}$$

9 Caracterización de KEA

9.1 KEA – Régimen hidrológico

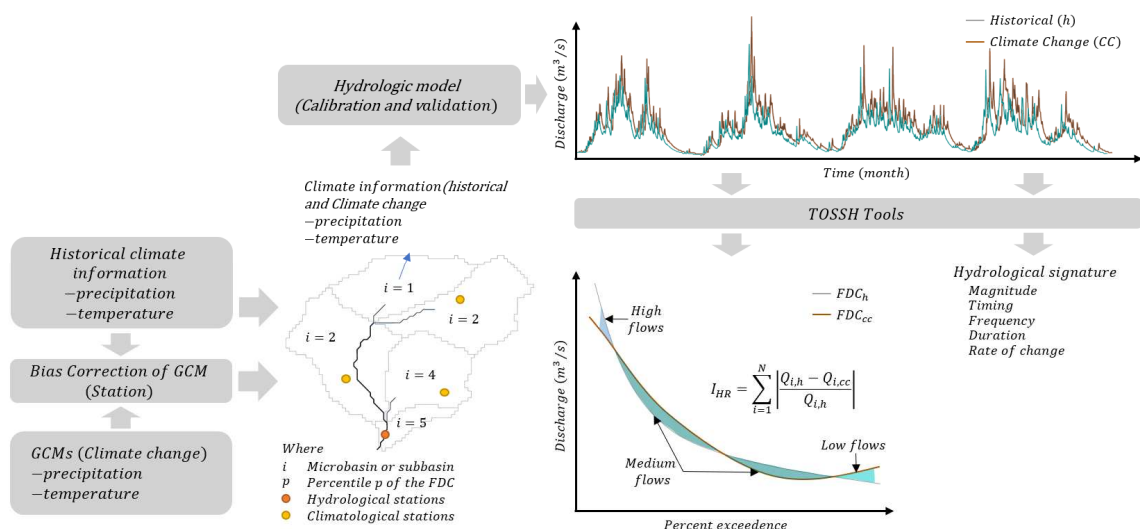
De acuerdo con Higgins et al. (2021), el régimen hidrológico es uno de los atributos ecológicos claves que debe ser considerados para la definición de esquemas de conservación. El régimen hidrológico hace referencia al comportamiento (tiempo, magnitud, duración y frecuencia) que experimentan los caudales de manera regular a lo largo del tiempo.

Por lo general, la caracterización del régimen hidrológico se realiza a través de diferentes métricas, indicadores o firmas hidrológicas que se extraen de los hidrogramas (series temporales de caudales) que son medidos en el río. Por diferentes aspectos logísticos y operacionales la VRO, no cuenta con estaciones

hidrométricas en todos sus afluentes, por lo que es necesario hacer uso de metodologías para la inferencia de información hidrológica. La modelación matemática hidrológica se constituye como una poderosa herramienta para solventar el déficit de información en cuencas, dado que permite a partir de relaciones matemáticas generar información para sitios en una cuenca que no se encuentran instrumentados.

Para la estimación de los indicadores de atributo e integridad, se construyó para toda la VRO un modelo matemático hidrológico a resolución de paso de tiempo mensual, partiendo de un ejercicio de modelación previo que fue calibrado y validado para toda la cuenca en mención (Nogales et al., 2021), siguiendo el protocolo de modelación. Se realizó una caracterización climática para la condición actual y también para la condición de cambio climático considerando que está es la amenaza identificada para este KEA. La síntesis del esquema metodológico abordado se presenta en la **Figura 40**.

Figura 40. Representación esquemática del cálculo de los dos grupos de índices de régimen hidrológico.



La información utilizada para la caracterización del KEA de Régimen Hidrológico, así como los modelos y herramientas de análisis pueden ser consultadas en el **Anexo 1**.

9.1.1 Caracterización climática – Histórica

Las características climáticas de Colombia están determinadas fundamentalmente por la situación geográfica del país y por sus cadenas montañosas, las cuales modifican en cierto grado las condiciones atmosféricas cerca de la superficie y originan situaciones meteorológicas de carácter local.

El clima de Colombia se ha descrito como típicamente tropical (Snow, 1976) en el sentido de que el rango diurno de la temperatura es bastante amplio en comparación de los rangos mensuales o anuales. Lessman y Eslava (1985) citados por Eslava (1994) dan las características generales de la zona de convergencia intertropical que juega un papel importante en la determinación del clima para Colombia.

La Zona de Convergencia Intertropical, (ZCIT), es una zona de la atmósfera en la que confluyen dos masas de aire con baja presión relativa. La diferencia entre los núcleos de alta presión y la ZCIT, da origen a movimientos horizontales del aire desde los trópicos hasta el ecuador. El curso anual de la ZCIT sigue el movimiento aparente del sol.

A principios de cada año la ZCIT se localiza hacia el sur del país. En esta área se presentan condiciones de elevada pluviosidad. En Colombia la ZCIT fluctúa, aproximadamente entre los 0° de latitud, posición en la que se encuentra en enero y febrero, y los 10° de latitud norte, posición extrema que se puede

alcanzar en julio – agosto. El desplazamiento origina que se presente en el año, un doble máximo y mínimo de precipitaciones y de los demás elementos meteorológicos.

Las áreas que no están, en un periodo dado, bajo la influencia de la ZCIT, se condicionan a los efectos de masas de aire relativamente seco y estable, y presentan en términos generales, buen tiempo, seco y soleado. Por el contrario, si están bajo la influencia de la ZCIT, el cielo es nuboso y se presentan bastantes lluvias.

Por lo anterior, se puede anotar que en la región andina central de Colombia el régimen de la precipitación presenta dos épocas de fuerte actividad pluvial (Abril – Mayo y Octubre – Noviembre) y dos periodos de escasas precipitaciones (Enero – Febrero y Julio – Agosto); los meses restantes se consideran intermedios o de transición.

Mientras que, en los llanos orientales, caracterizado por un periodo seco entre diciembre y marzo y uno lluvioso entre mayo y noviembre, con algunas épocas intermedias de menor precipitación, esto se debe a que la ZCIT se hace sentir en aquellas dos regiones a lo largo de estos siete meses.

La temperatura media del aire y la humedad relativa tienen una oscilación mucho menor que la precipitación a lo largo del año. Estos dos parámetros meteorológicos, al igual que los restantes, están influenciados por las condiciones de circulación predominantes, lo cual se observa en forma más clara en sus valores extremos. Las temperaturas máximas y mínimas absolutas suelen registrarse en las épocas de menor pluviosidad, cuando la nubosidad casi nula y la baja humedad del aire permiten una alta recepción de la radiación solar (temperaturas máximas) en la superficie durante el día, y a su vez, facilitan una mayor pérdida de desde el suelo – por radiación de onda larga – durante las noches (Temperatura mínimas) (Boshell, 1982).

Para la zona de la Orinoquía al costado oriental de los Andes tropicales, los vientos alisios traen mucha humedad desde el este, pues vienen cargados de agua del océano Atlántico y la cuenca del Amazonas. Por esta razón, la cordillera Oriental, que se vuelve en la Orinoquia venezolana cordillera de Mérida y luego la cordillera de La Costa, se convierte en una barrera natural que va deteniendo los vientos y cargando de humedad las montañas.

Presentando un solo periodo de lluvias y otro seco en el valle del Orinoco, las ondas del oriente, los huracanes del Caribe y el movimiento de las masas húmedas del Brasil se combinan para dar origen entre marzo y noviembre al periodo de altas lluvias, y al periodo seco entre diciembre y noviembre.

El análisis que se presenta en este apartado tiene como objetivo dar una aproximación al entendimiento de las condiciones climáticas en la VRO, el proceso que se lleva a cabo parte del análisis de información observada de estaciones hidro climatológicas en Colombia, se realizan los procesos tradicionales de consistencia y calidad de información y se determina el concepto de variabilidad climática e hidrológica que permite explicar procesos de estacionalidad, influencia de patrones Océano-Atmosféricos y algunos procesos de baja frecuencia que logran explicar los cambios a largo plazo en las variables climáticas.

9.1.1.1 Selección de estaciones

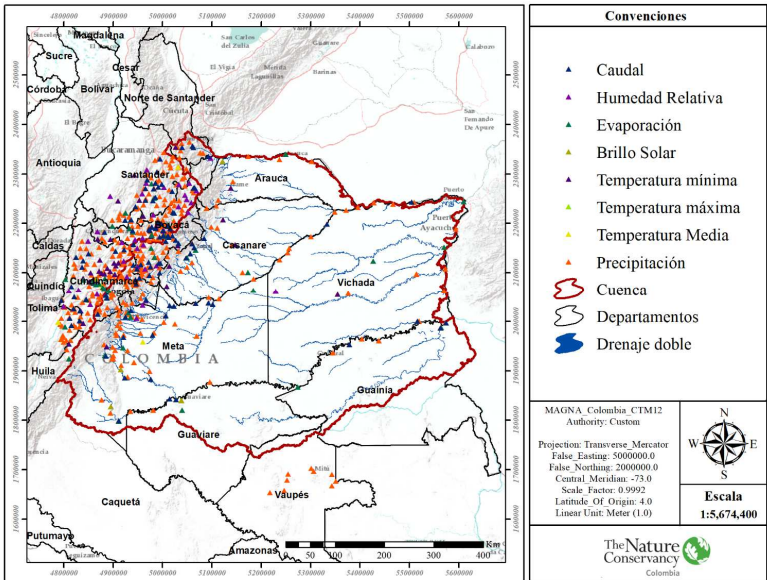
En el análisis del clima histórico para la VRO se utilizó la información de las estaciones provenientes del catálogo de estaciones del IDEAM (Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales), la información fue extraída tomando como referencia el polígono de la VRO. Es importante resaltar que se incluyó información aledaña al pie de monte andino como condición de frontera para futuros análisis en la determinación de campos interpolaciones climáticos, como se observa en la **Figura 41** en la zona centro y oriental de la cuenca existe una limitante en cuanto a disponibilidad de información.

A nivel climático, fueron seleccionadas para la variable de precipitación 483 estaciones, para temperatura media 120, para temperatura máxima 109 y para temperatura mínima 122. Respecto a la variable brillo solar se seleccionaron 63 estaciones, de evaporación 70 y por último caudal con 89 estaciones. El periodo temporal en el cual se recolectó la información correspondió a 1970 a 2022. En la **Tabla 23** se identifican las variables y el número de estaciones seleccionadas por variable y en la **Figura 41** se muestran a nivel espacial las estaciones seleccionadas para la cuenca.

Tabla 23. Número de estaciones seleccionadas por variable

Variables	Estaciones Seleccionadas
Precipitación	483
Temperatura media	120
Temperatura máxima	109
Temperatura mínima	122
Brillo solar	63
Evaporación	70
Caudal	89

Figura 41. Mapa de estaciones seleccionadas en la VRO



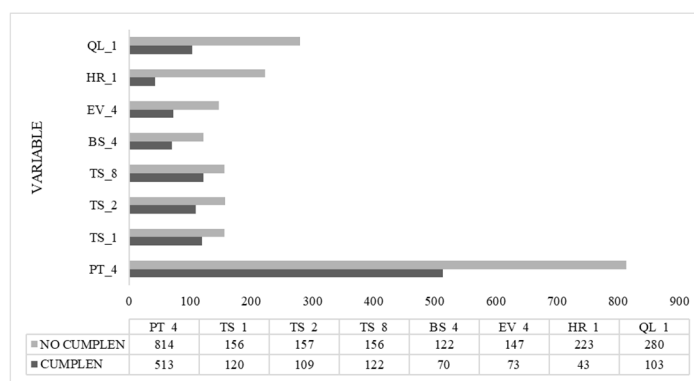
9.1.1.2 Consistencia y calidad de información

Teniendo en cuenta la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM No 168 (WMO, 2011) y los estándares de calidad aplicables para Colombia, se realizó el análisis de consistencia de la información a las series de tiempo de cada estación para las variables precipitación, temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima, caudal, evaporación y brillo solar, el procedimiento aplicado pretende la obtención de la mejor calidad en la información y de esta manera la reducción de la incertidumbre en la caracterización climatológica y posterior, hidrológica.

Posterior al análisis de datos anómalos, se aplicó una prueba de completitud de los datos, donde se considera la longitud esperada y observada de la serie. De acuerdo con los términos, el periodo efectivo de registro de la serie no puede ser inferior a 20 años. Adicionalmente, se incluyó un criterio de consistencia el cual considera un porcentaje de datos faltantes inferior al 30 %. Para aprobar el análisis de completitud la serie debe cumplir con los dos criterios simultáneamente

La **Figura 42** muestra el número de estaciones por variable que cumple con los criterios de más de 20 años de registros y que su porcentaje de datos faltantes sea menor al 30%.

Figura 42. Estaciones que cumplen criterios de consistencia por variable



9.1.1.3 Detección de datos anómalos

Para la identificación de anómalos se aplicó la metodología de Grubbs o prueba residual normalizada extrema (Grubbs, 1950). La prueba de Grubbs se utiliza para detectar valores atípicos en un conjunto de datos univariante y se basa en el supuesto de normalidad esto implica que primero debe verificarse que los datos pueden aproximarse a una distribución normal antes de aplicar la prueba. Esta prueba busca identificar aquellos valores que difieren de las condiciones normales del conjunto estadístico o la serie de tiempo. El estadístico se determina mediante la siguiente ecuación.

$$\Gamma = \frac{\max |x_i - \bar{x}|}{\sigma}$$

Donde:

Γ : Estadístico de Grubbs

x_i : Observación “i”

$\bar{x}$: Promedio de las observaciones

σ : Desviación estándar de la muestra

Cuando se realiza un análisis de distribución de dos colas el Estadístico de Grubbs se evalúa para valores máximos (cola derecha) como:

$$\Gamma = \frac{x_{max} - \bar{x}}{\sigma}$$

Y para valores mínimos (cola izquierda) como:

$$\Gamma = \frac{\bar{x} - x_{min}}{\sigma}$$

Donde:

x_{max} : Valor máximo de las observaciones

x_{min} : Valor mínimo de las observaciones

$$\Gamma < \frac{(\eta - 1)}{\sqrt{\eta}} \sqrt{\frac{(t_{(\alpha/2\eta), \eta-2})^2}{\eta - 2 + (t_{(\alpha/2\eta), \eta-2})^2}}$$

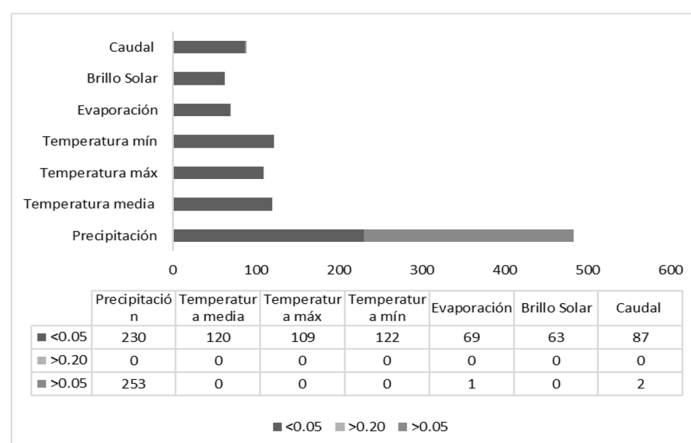
Donde:

η : Número de datos

$t_{(\alpha/2\eta),\eta-2}$: Valor crítico de la distribución de $t_{student}$ con $\eta - 2$ grados de libertad y nivel de significancia $\alpha/2\eta$

La **Figura 43** muestra la cantidad de estaciones por rango de porcentaje de anómalos, siendo rango de menor a 0.05, mayor a 0.05 y mayor a 0.20, la totalidad de las variables cuenca con series de tiempo con porcentajes menores a 0.5% de valores anómalos en las estaciones seleccionadas.

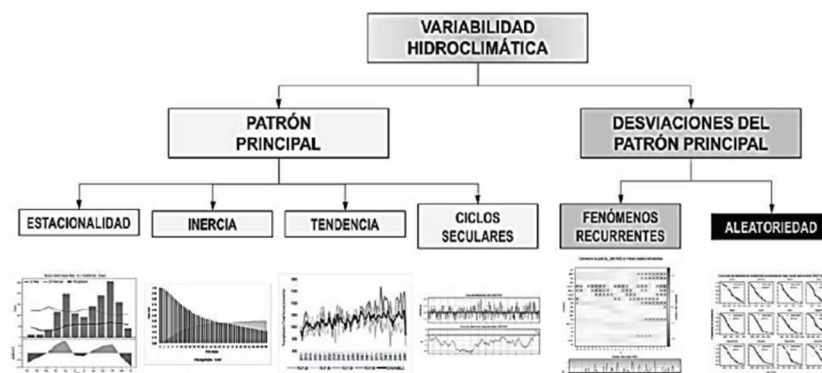
Figura 43. Cantidad de estaciones por rango de porcentaje de anómalos



9.1.1.4 Variabilidad climática e hidrológica

Los fenómenos hidroclimáticos tienen componentes deterministas y aleatorios. Por el lado de la variabilidad climática se refiere a las variaciones en el estado medio y otras estadísticas del clima, en diferentes escalas temporales y espaciales, esta puede obedecer a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en fuerzas externas de origen antropogénico o natural (variabilidad externa). En cuanto a la variabilidad hidrológica, los fenómenos hidrológicos tienen variaciones en tiempo y espacio que pueden estar influenciadas por factores fisiográficos como por actividades humanas y animales. La principal causa de variabilidad hidrológica temporal puede estar asociada a procesos meteorológicos que controlan la precipitación y la evaporación. La **Figura 44** muestra los componentes que comprenden el concepto de variabilidad hidroclimática.

Figura 44. Componentes concepto variabilidad hidroclimática



Fuente: Domínguez Calle (2018)

9.1.1.4.1 Patrón principal

El patrón principal se puede entender como aquel mecanismo que está presente en el sistema hidro climático y que está marcado fuertemente por ciclos de alta y baja frecuencia como se presenta en estacionalidad y ciclos seculares y a través de procesos que se pueden detallar por medio del mismo proceso como lo muestra la inercia y la tendencia (Domínguez Calle, 2018).

9.1.1.4.1.1 Estacionalidad

La estacionalidad se puede entender a través de las fluctuaciones presentes en los sistemas hidro climáticos que se reflejan en repeticiones en un periodo menor o igual a un año y que pueden ser predichas.

El análisis climatológico determinando la estacionalidad de las series de tiempo, se realizó ajustando los conjuntos estadísticos mensuales a funciones de distribución de probabilidad, estimando la estacionalidad a partir del primer momento estadístico, también conocido como valor esperado o esperanza matemática, es el valor de tendencia central de las variables aleatorias. Para variables discretas, este resulta ser análogo al promedio ponderado, mientras que, para variables continuas, tal como las distribuciones a las que se ajustan las variables de este estudio, se describe con la siguiente ecuación (Ross, 2007):

$$E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$$

Así pues, el valor esperado representa la magnitud con mayor probabilidad de ocurrencia para cada conjunto estadístico, es decir para cada mes en cada una de las series analizadas.

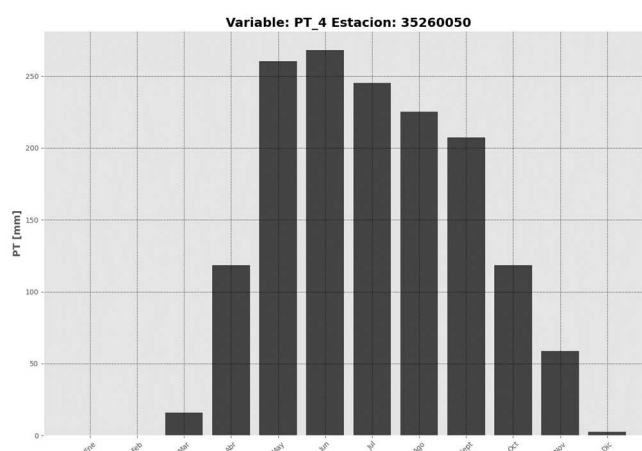
Precipitación total

El comportamiento de la precipitación en el área de interés sugiere un comportamiento con valores mensuales multianuales que alcanzan hasta los 268 mm, referente a la estacionalidad, donde predomina un comportamiento con altos valores de precipitaciones entre los meses de abril y agosto. Los análisis se realizaron para todas las estaciones seleccionadas posterior al proceso de consistencia y calidad de información, sin embargo, a continuación, solo se presenta una de las estaciones ubicada en la zona central del área de estudio. En la **Tabla 24** y **Figura 45** se presenta el momento 1 o esperanza matemática que describe el comportamiento histórico de la variable para la estación Vuelta Mala (35260050) ubicada en el departamento de Casanare

Tabla 24. Valores medios mensuales multianuales para precipitación total

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
35260050	0	0	15.81	118.3	260.5	268.0	245.4	225.3	207.5	118.49	58.63	2.57

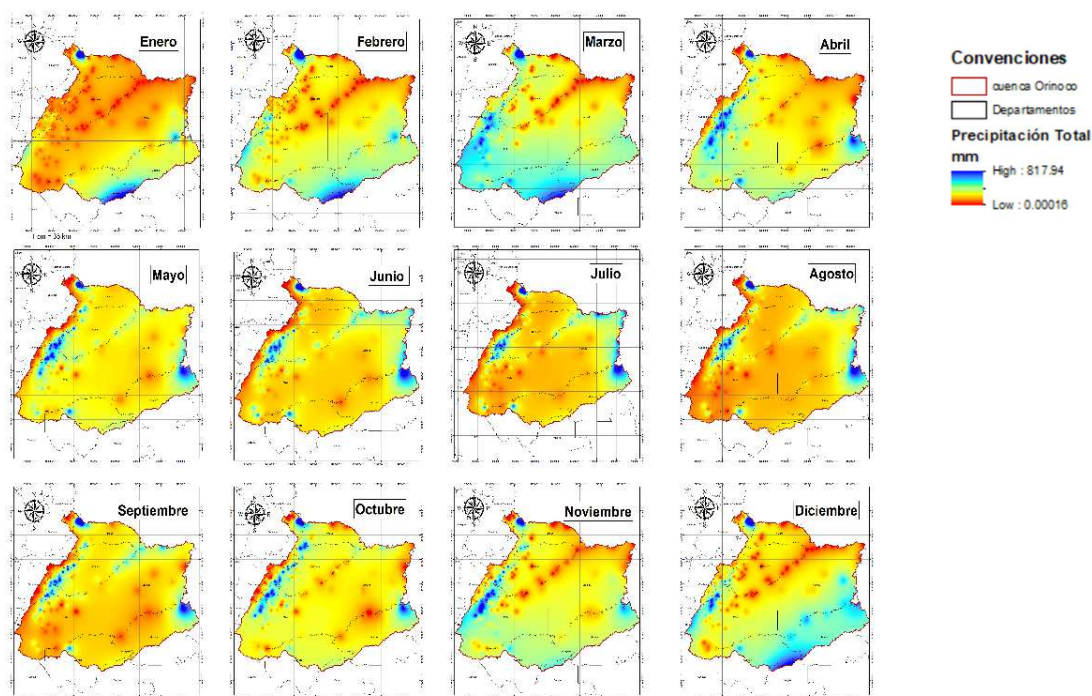
Figura 45. Valor medio mensual de precipitación para la estación Vuelta Mala 35260050



El máximo valor que se registra corresponde al mes de junio con 268 mm, lo cual podría considerarse alto en relación con la pluviosidad promedio mensual en otras zonas del país, respecto al valor mínimo este se presenta en el mes de enero y febrero con un valor de 0 mm.

En la **Figura 46** se muestra el comportamiento espacial en la VRO, los valores mínimos se presentan en color rojo y los más altos en color azul, en los primeros meses del año los valores máximos se observan en la zona baja de la cuenca, entre los meses de mayo a septiembre la condición máxima se presenta en la zona oriental de la cuenca, finalizando el año la condición máxima predomina en la zona baja de la cuenca.

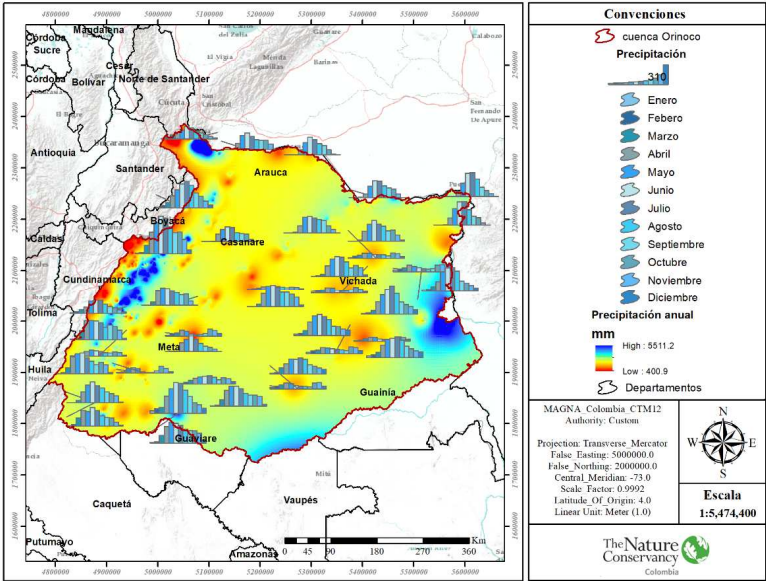
Figura 46. Distribución espacial de la precipitación total media mensual multianual para la VRO



La distribución anual de la precipitación en la VRO es caracterizada por la predominancia de sabana, se ve influenciada por la posición de la ZCIT (Poveda & Mesa, 1997). Los ecosistemas de sabana se caracterizan por una cantidad de lluvias relativamente más baja. La precipitación decrece desde los 5.000

mm en la cuenca del río Arauca, pasando por 4.500 mm, en la ladera de la cordillera Oriental, cerca de las estaciones de Villavicencio, Tauramena, Chámeza, La Reventonera, Pajarito, El Japón, Salinas de Upín, hasta los 1.500 mm en el extremo oriental del departamento de Arauca. Hacia el sur, la precipitación, que surte entre 150 y 200 días, oscila entre 2.500 mm y 3.500 mm en gran parte de los departamentos del Meta, Vichada, Guainía y Guaviare (Insituto Humbolt Colombia et al., 2018).

Figura 47. Distribución espacial del valor anual para precipitación total



En la **Figura 47** se presenta la distribución anual de precipitación, donde se observa valores anuales totales en un rango de 400 a 5511 mm. Adicionalmente se presentan los histogramas en diferentes estaciones de la esperanza matemática o valor esperado que describe el comportamiento mensual multianual de la variable precipitación. Se resalta de los resultados como predomina la condición de alta humedad entre los meses de junio a agosto en gran parte del territorio de la VRO.

Temperatura Media

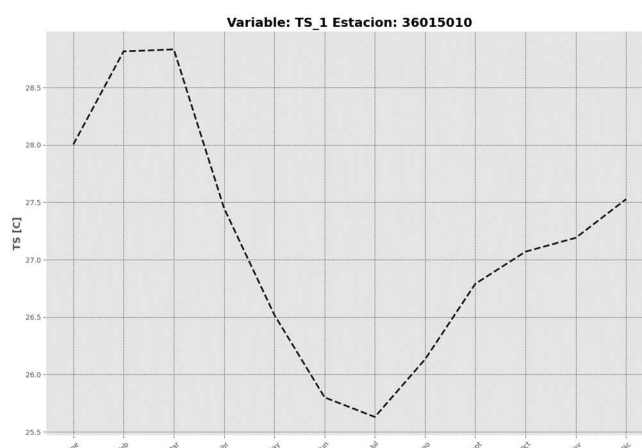
La temperatura es una variable de gran importancia para el entendimiento del comportamiento climático y ecosistémico en el área de estudio, con el fin de establecer un análisis temporal, se toma como referencia la estación “Paz de Ariporo” con código IDEAM 36015010, esta se encuentra ubicada en Casanare, en la siguiente, **Tabla 25** y **Figura 48** se presenta el comportamiento estacional, representados por el primer momento estadístico o esperanza matemática el cual describe aquellas variaciones presentes en los sistemas climáticos.

Se observa una variación de la temperatura en un rango de 25.62 a 28.83°C, una variación de aproximadamente 3.21 °C desde la condición mínima a la máxima, la dinámica en torno a la temperatura es inversa al comportamiento de la pluviosidad, se observa dos condiciones de aumento de temperaturas en los meses de febrero y marzo. La condición mínima se presenta en los meses de junio y julio los cuales corresponden a los valores máximos de humedad en este sector de la VRO.

Tabla 25. Valores medios mensuales multianuales temperatura media

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
36015010	28.00	28.81	28.83	27.44	26.51	25.80	25.62	26.13	26.78	27.06	27.19	27.52

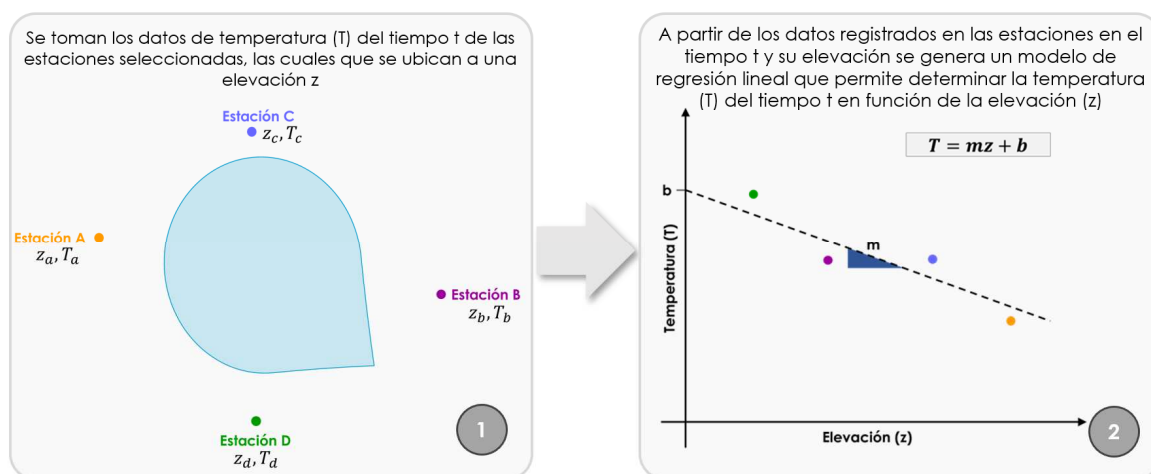
Figura 48. Valor medio mensual de temperatura para la estación Paz de Ariporo 36015010



En la distribución espacial de la temperatura media, se emplea la metodología de gradiente térmico y gradiente altitudinal, ya que existe una relación lineal entre la altitud y la temperatura en latitudes ecuatoriales de aproximadamente 0.6 °C por la variación negativa cada 100 msnm (Dominguez, 2015).

El procedimiento consiste en generar regresiones lineales entre el valor de la temperatura anual de las estaciones y su respectivo valor de altitud, una vez determinada la ecuación representativa de la temperatura, haciendo uso del modelo de elevación digital de la zona por algebra de mapas se generan los campos de temperatura mensual multianual (ver **Figura 49**).

Figura 49. Esquematzación del procedimiento para generación de campos de temperatura



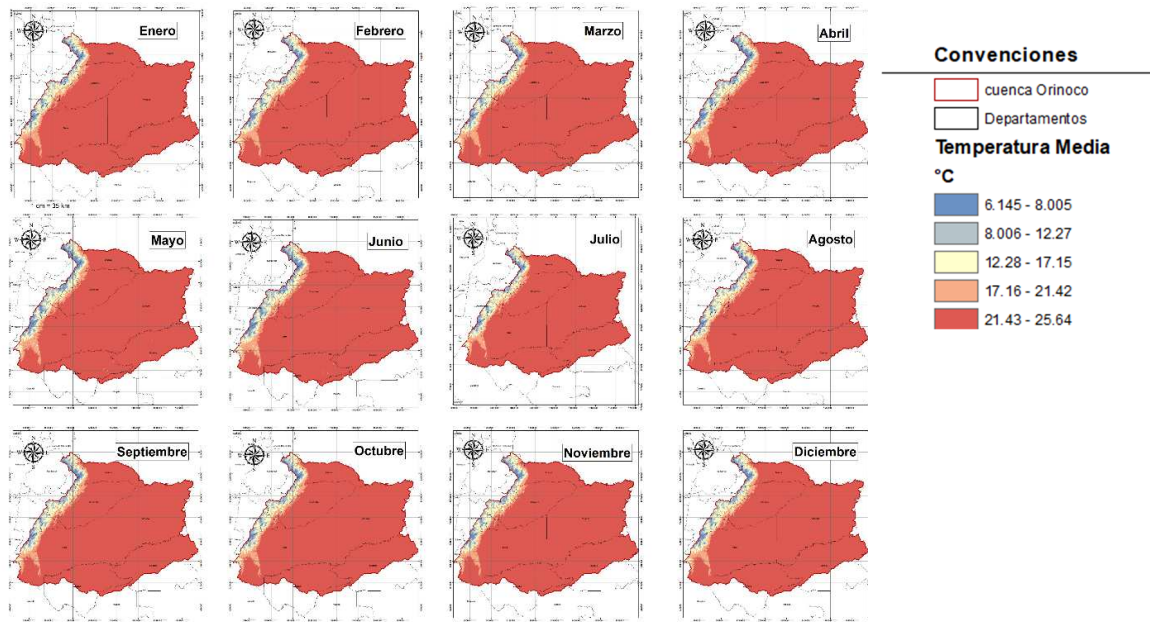
Fuente: Adaptada de Tarulla S.A.S, 2023

En la **Figura 50** se presenta la distribución espacial de temperatura media en la VRO, en general, la cuenca tiene una temperatura media alta y constante, con una variación relativamente baja a lo largo del año, durante los meses de verano, las temperaturas son más altas, con una media de alrededor de 28°C en la región, durante los meses de invierno, las temperaturas son ligeramente más bajas, con una media de alrededor de 25°C.

El comportamiento de la temperatura en la VRO presenta variaciones espaciales y estacionales. Las mayores variaciones de la temperatura son espaciales, ya que regiones como el norte de Arauca y el extremo oriental de Vichada pueden alcanzar una temperatura media anual de 28°C. La zona de La

Macarena, al suroccidente del Meta, tiene una temperatura de 25°C, mientras que en zonas de la cordillera andina hay valores descendentes conforme aumenta la altitud, llegando hasta los 7°C (CORMACARENA et al., 2017).

Figura 50. Distribución espacial de la temperatura media mensual multianual para la VRO



Temperatura Máxima

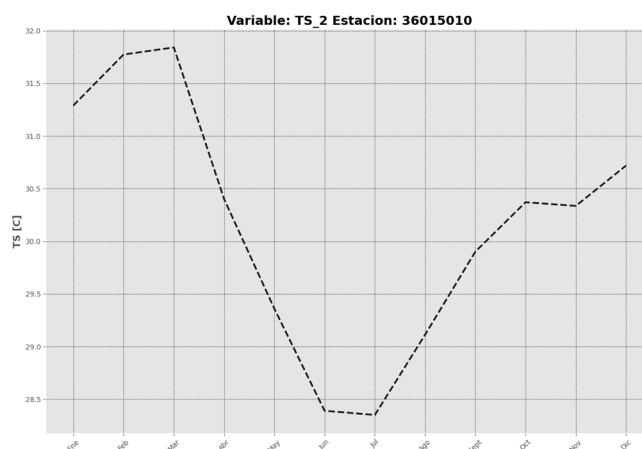
Para el análisis de temperatura máxima se toma como referencia la estación “Paz de Ariporo” con código IDEAM 36015010, esta se encuentra ubicada en Casanare, en la **Tabla 26** y **Figura 51** se presenta el comportamiento estacional, representados por el primer momento estadístico o esperanza matemática el cual describe aquellas variaciones presentes en los sistemas climáticos.

Se observa una variación de la temperatura en un rango de 28.35 a 31.84°C, una variación de aproximadamente 3.49 °C desde la condición mínima a la máxima, la dinámica en torno a la temperatura es inversa al comportamiento de la pluviosidad, se observa dos condiciones de aumento de temperaturas en los meses de enero a marzo y octubre a diciembre. La condición mínima se presenta en los meses de junio y julio los cuales corresponden a los valores máximos de humedad en este sector de la cuenca.

Tabla 26. Valores medios mensuales multianuales temperatura máxima

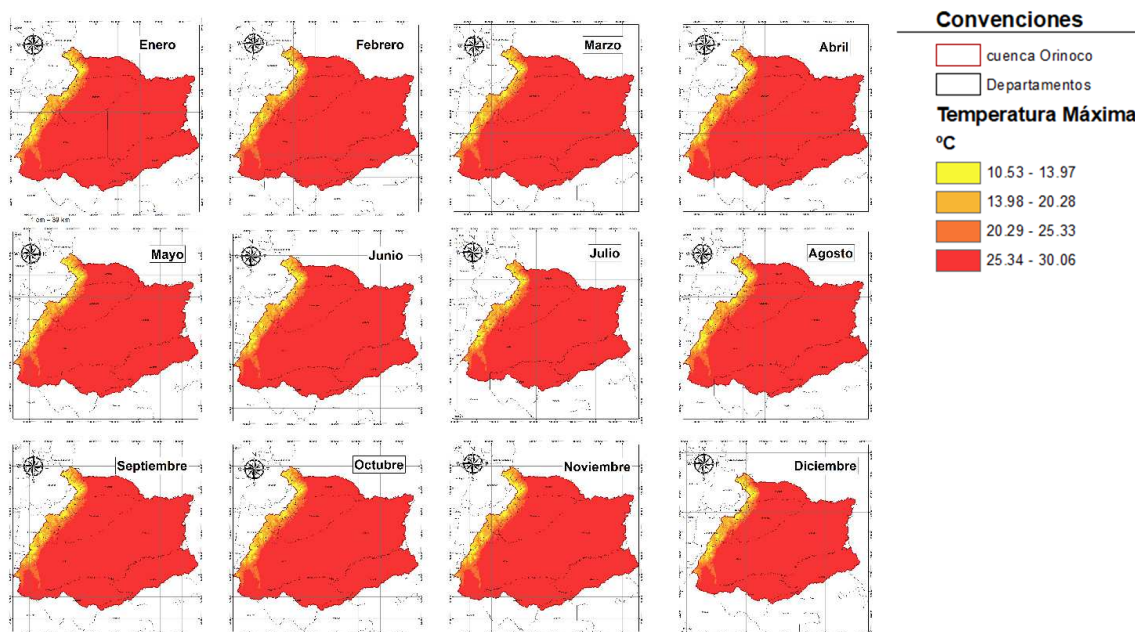
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
33055010	31.28	31.77	31.84	30.40	29.36	28.39	28.35	29.11	29.90	30.37	30.33	30.71

Figura 51. Valor medio mensual de temperatura máxima para la estación Paz de Ariporo 36015010



En la **Figura 52** se presenta la distribución espacial de temperatura máxima en la VRO, en general, la cuenca tiene una temperatura media alta y constante, con una variación relativamente baja a lo largo del año, durante los meses de verano, las temperaturas son más altas, con un valor alrededor de los 31°C en la región.

Figura 52. Distribución espacial de la temperatura máxima mensual multianual para la VRO



Temperatura Mínima

Para el análisis de temperatura mínima se toma como referencia la estación “Paz de Ariporo” con código IDEAM 36015010, esta se encuentra ubicada en Casanare, en la **Tabla 27** y **Figura 53** se presenta el comportamiento estacional, representados por el primer momento estadístico o esperanza matemática el cual describe aquellas variaciones presentes en los sistemas climáticos.

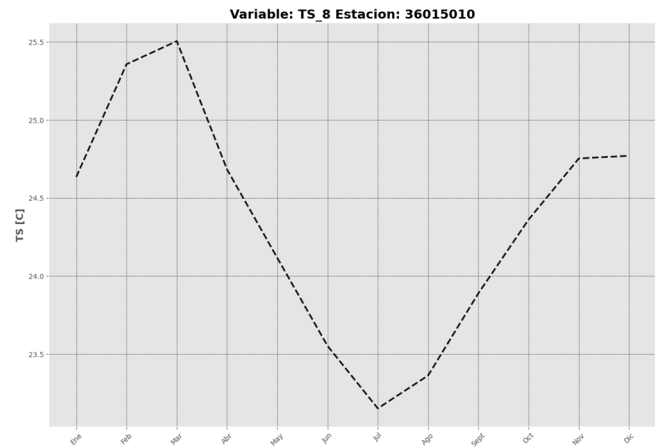
Se observa una variación de la temperatura en un rango de 23.15 a 25.35°C, una variación de aproximadamente 2.2 °C desde la condición mínima a la máxima, la dinámica en torno a la temperatura es inversa al comportamiento de la pluviosidad, se observa dos condiciones de aumento de temperaturas

en los meses de enero a marzo y octubre a diciembre. La condición mínima se presenta en los meses de junio a septiembre los cuales corresponden a los valores máximos de humedad en este sector de la cuenca.

Tabla 27. Valores medios mensuales multianuales temperatura mínima

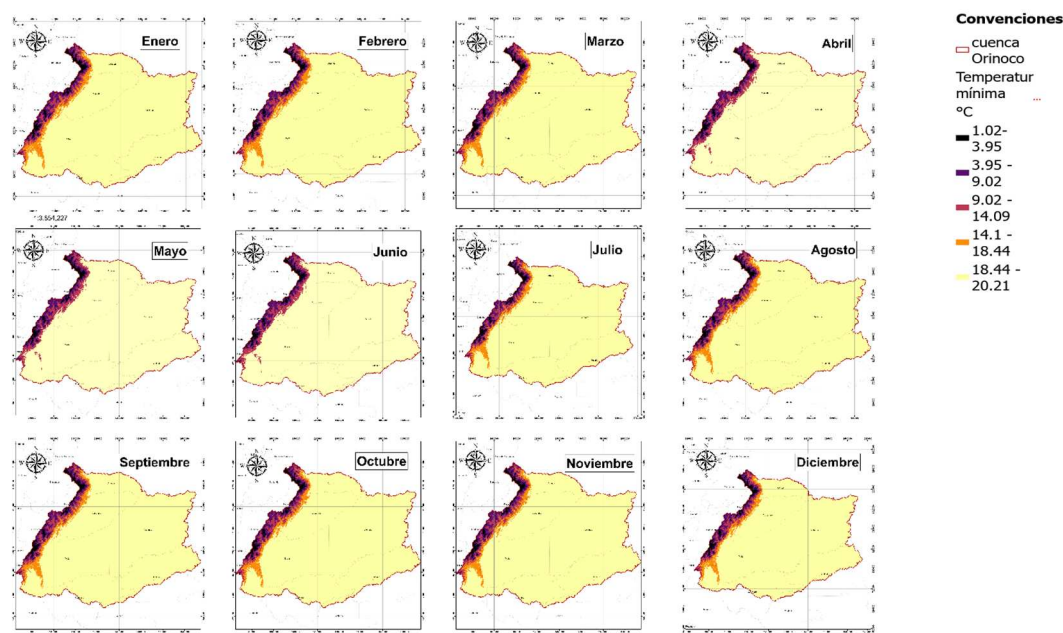
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
33055010	24.63	25.35	25.50	24.68	24.11	23.55	23.15	23.36	23.88	24.36	24.75	24.77

Figura 53. Valor medio mensual de temperatura mínima para la estación Paz de Ariporo 36015010



En la Figura 54 se presenta la distribución espacial de la temperatura mínima, aunque las variaciones oscilan entre 2 -3 °C, se observan en colores más oscuros aquellas zonas con valores más bajo de temperatura mínima en el pie de monte andino, en el sector central y oriental la temperatura se mantiene con variaciones de aproximadamente un grado, adicionalmente es posible observar aquellos meses donde las precipitaciones son altas presentan las mayores variaciones, aproximadamente entre marzo y octubre.

Figura 54. Distribución espacial de la temperatura mínima mensual multianual para la VRO



Evaporación

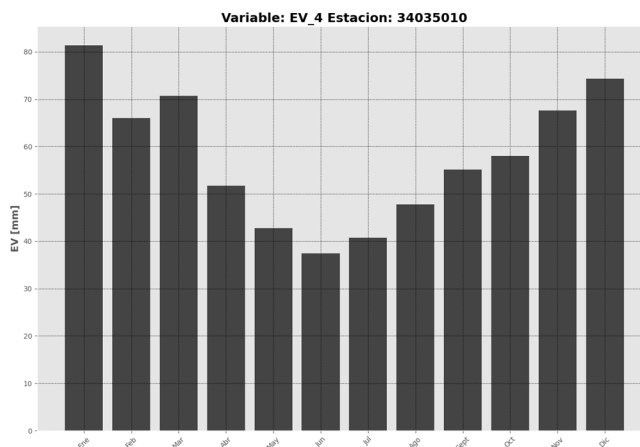
Para el análisis de evaporación se toma como referencia la estación “Tuparro bocas-Tomo” con código IDEAM 34035010, esta se encuentra ubicada en Vichada, en la **Tabla 28** y **Figura 55** se presenta el comportamiento estacional, representados por el primer momento estadístico o esperanza matemática el cual describe aquellas variaciones presentes en los sistemas climáticos.

Se observa una variación de la evaporación en un rango de 37.42 a 81.31 mm, una variación de aproximadamente 43.89 mm desde la condición mínima a la máxima, la dinámica en torno a la evaporación responde a cambios en la temperatura y la radiación solar. Se observa que los valores más altos de evaporación corresponden a los meses de enero y diciembre que es donde se presentan las temperaturas más altas en la cuenca. Por otro lado, la evaporación más baja se presenta en los meses de junio y julio.

Tabla 28. Valores medios mensuales multianuales de evaporación

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
34035010	81.31	66.04	70.69	51.67	42.79	37.42	40.68	47.75	55.17	57.97	67.60	74.33

Figura 55. Valor medio mensual de evaporación para la estación Tuparro bocas-Tamo 34035010



9.1.1.4.1.2 Tendencia

La tendencia, según el concepto de variabilidad climática e hidrológica, se refiere a un patrón o dirección a largo plazo en los cambios o fluctuaciones en el clima y en los recursos hídricos, en el campo de series hidro climatológicas tendencia es la velocidad a la cual la variable de análisis cambia durante un periodo de tiempo, el comportamiento puede ser lineal o no lineal. Una de las técnicas para la detección de tendencia es la regresión lineal simple, Mann-Kendall, pruebas de correlación de rango de Spearman entre otras.

Para la estimación de la tendencia se utilizó la técnica Mann-Kendall que consiste en la comparación entre los valores que componen una misma serie temporal en orden secuencial, también considera la hipótesis de estabilidad de la serie temporal (Velasco Sánchez, 2016).

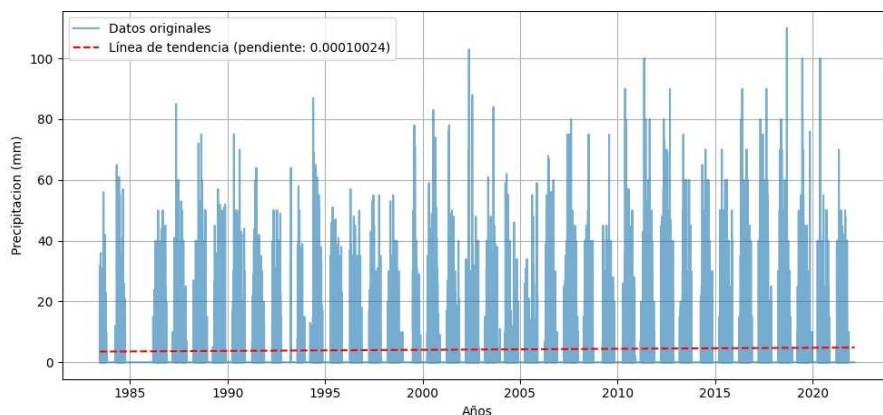
$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

$x_j - x_i$ = datos secuenciales n = tamaño de la muestra

Precipitación total

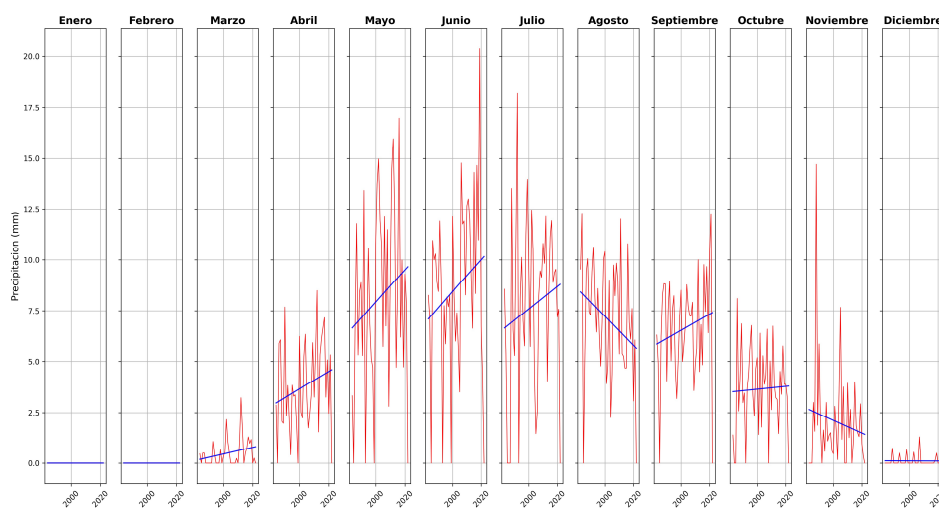
La **Figura 56** muestra la tendencia en una serie diaria de precipitación total desde 1985 hasta el 2022 para la estación Vuelta Mala 35260050, lo que nos muestra la línea de tendencia que como resultado tiene una pendiente muy baja, aunque positiva, el comportamiento en el tiempo de la precipitación muestra una tendencia un poco creciente con los años en los mm de agua para esta estación con respecto a los 37 años analizados.

Figura 56. Tendencia para la variable de precipitación total correspondiente a la estación Vuelta Mala 35260050



La **Figura 57** muestra la tendencia en conjuntos estadísticos, es decir muestra el comportamiento mensual de la precipitación en el rango de años de 1985 a 2022 para la estación Vuelta Mala 35260050, lo que muestra esta gráfica es que los meses con una tendencia positiva más pronunciada en el rango de tiempo son mayo y junio esto quiere decir que el comportamiento de la precipitación de esos meses a través de los años ha aumentado en mm para esa estación. Por el contrario, el mes de agosto y noviembre presentan una tendencia negativa lo cual indica que la cantidad de mm para esos meses con respecto al tiempo ha disminuido para esa estación en específico.

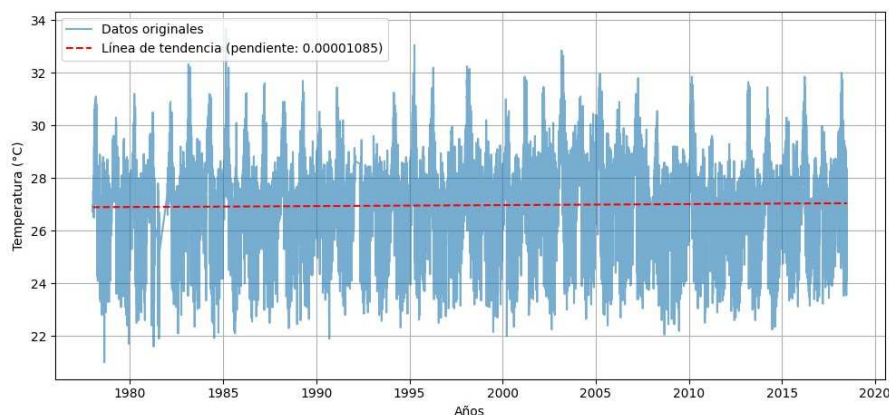
Figura 57. Tendencia por conjuntos estadísticos precipitación total para la estación Vuelta Mala 35260050



Temperatura media

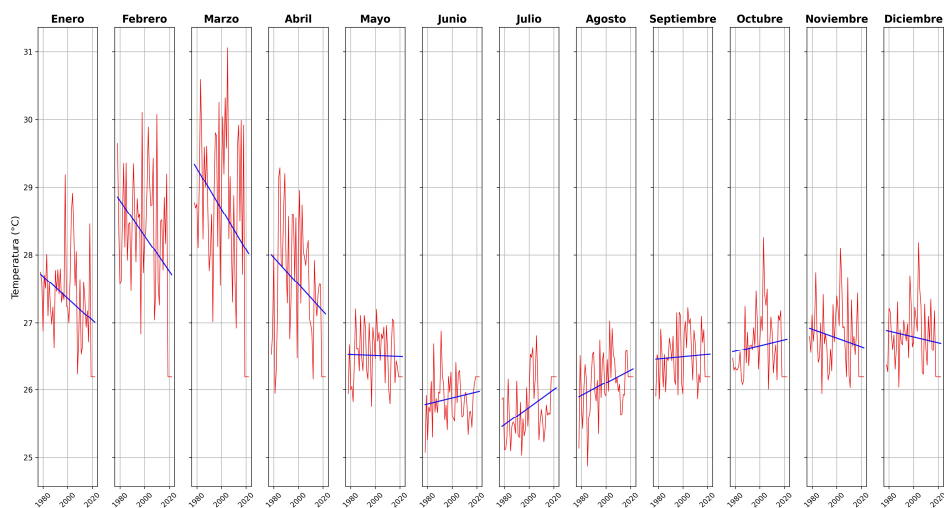
La **Figura 58** muestra la tendencia anual de temperatura media desde 1985 hasta el 2022 para la estación Aeropuerto Santiago Pérez (37055010), lo que nos muestra la línea de tendencia que como resultado tiene una pendiente poco pronunciada que va en aumento a lo largo del tiempo, lo que puede evidenciar una variación en la temperatura (°C) que normalmente registra esta estación.

Figura 58. Tendencia para la variable de temperatura media de la estación Aeropuerto Santiago Pérez (37055010)



La **Figura 59** muestra la tendencia en conjuntos estadísticos, es decir muestra el comportamiento mensual de la temperatura en el rango de años de 1985 a 2022 para la estación Aeropuerto Santiago Pérez (37055010), en primer lugar se observar el comportamiento estacional inverso al comportamiento de la precipitación, con periodos altos en los primeros meses del año y al finalizarlo, la condición baja entre los meses de marzo a noviembre, respecto a la tendencia se observa como de enero a abril y noviembre y diciembre la tendencia es negativa lo que sugiere una disminución de la temperatura en aquellos instantes de tiempo, para los meses restantes y en especial en el mes de julio donde se presentan el valor máximo de precipitación, se observa una tendencia en la temperatura media en aumento, es decir a lo largo de los años se presentan variaciones de temperatura en condiciones extremas, disminuyendo en altas y aumentando en condiciones bajas, lo cual podría implicar en una desestabilización del ciclo hidrológico.

Figura 59. Tendencia por conjuntos estadísticos para temperatura media de la estación Aeropuerto Santiago Pérez (37055010)



9.1.1.4.1.3 Inercia

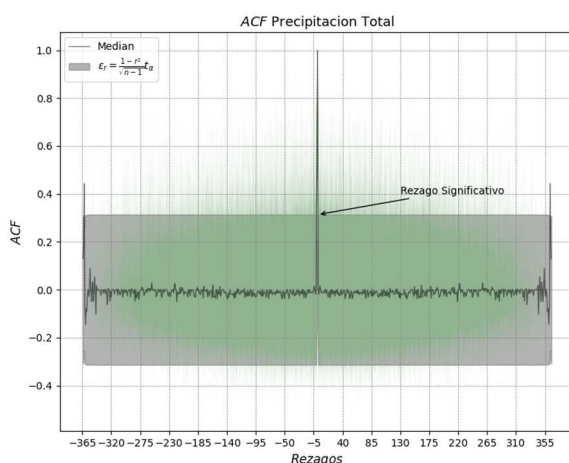
Se entiende la inercia como la memoria a corto plazo que tiene el proceso hidrológico, esto en cuanto a la dependencia de los valores de alguna variable en el instante de tiempo (Domínguez Calle, 2018).

Para el cálculo de la inercia de las diferentes variables se realiza una autocorrelación a la serie previamente desestacionalizada para la estimación de patrones en las series de tiempo.

Precipitación total

La **Figura 60** evidencia la inercia para precipitación total en grupos diarios. Para esta se calcula la autocorrelación comparando los valores de precipitación en un día con los valores de días anteriores siendo estos los rezagos. Se destaca un rezago significativo en el rango de -5 a 10 días esto indica una correlación fuerte entre la precipitación actual y la precipitación de los días anteriores dentro de ese rango. Sugiriendo que la cantidad de precipitación esta influenciada por la cantidad de precipitación de los días anteriores.

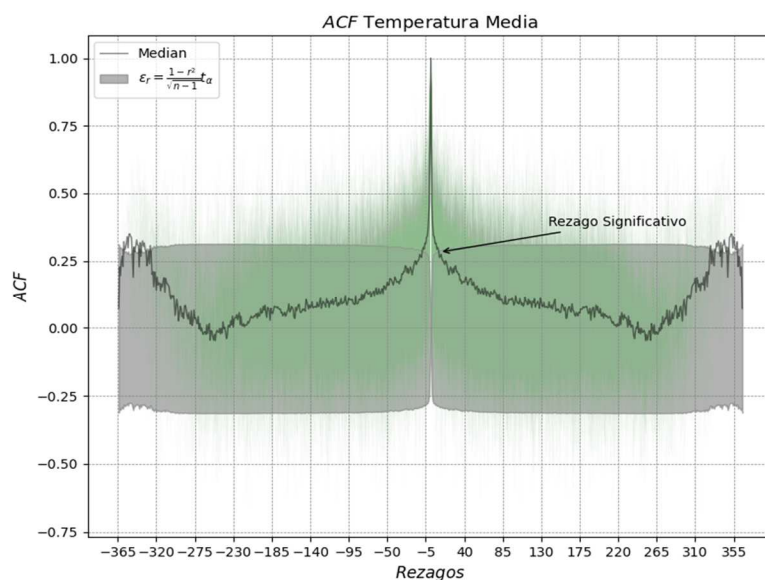
Figura 60. Resultado autocorrelación precipitación total para determinar inercia



Temperatura media

La **Figura 61** evidencia la inercia para temperatura media en grupos diarios. Donde se evidencia que la correlación es mayor a 0.3 para los rezagos de -2 a 10 días indicando una relación entre la temperatura actual y la temperatura presentada días anteriores dentro de ese rango. Esta correlación a su vez sugiere que la temperatura puede estar influida por la temperatura presentada en días recientes en ese intervalo de rezago.

Figura 61. Resultado autocorrelación temperatura media para determinar inercia



9.1.1.4.1.4 Ciclos seculares

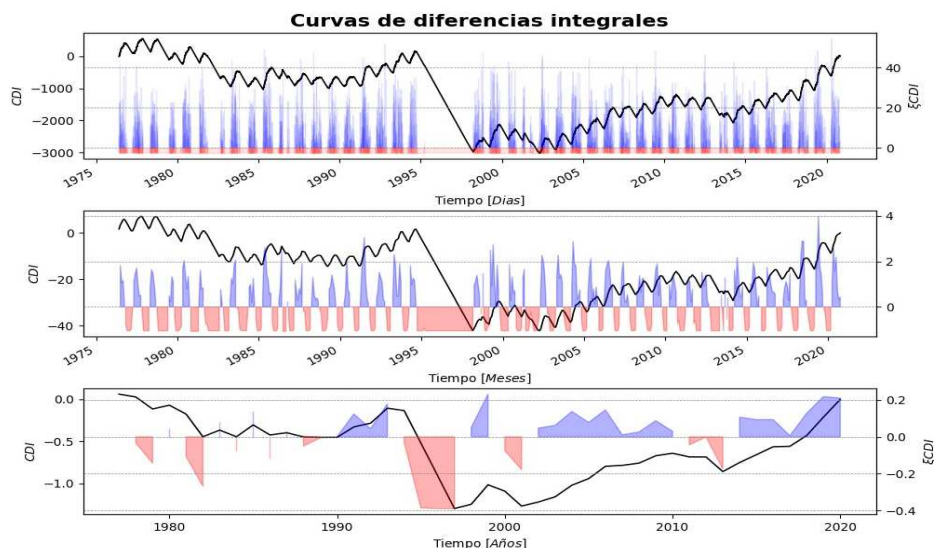
Los ciclos seculares son oscilaciones de baja frecuencia presentes en las variaciones temporales de las variables hidroclimáticas. El periodo de estos ciclos alcanza decenas de años. La estructura de estos ciclos es invariante en la escala temporal del análisis, la forma de las oscilaciones no cambia con respecto a la resolución temporal de los datos (Domínguez Calle, 2018).

Para la determinación de estos ciclos existen herramientas de transformación de datos como por ejemplo las transformadas de Fourier, curvas de diferencias integrales, entre otras. En este caso se utilizaron las curvas de diferencias integrales que son construidas a partir de la suma acumulada de las desviaciones estandarizadas de los datos a los que se les quiere determinar los ciclos de baja frecuencia (Domínguez Calle, 2018).

Precipitación total

En la **Figura 62** se evidencia el resultado de los ciclos seculares calculados por medio de las curvas de diferencias integrales para precipitación donde se identifican los resultados a nivel diario, mensual y anual. Se puede evidenciar patrones estacionales en todas las escalas de tiempo sin embargo para la escala anual pueden verse relacionados con fenómenos climáticos a mayor escala como fluctuaciones climáticas a largo plazo o cambios en patrones de circulación atmosférica.

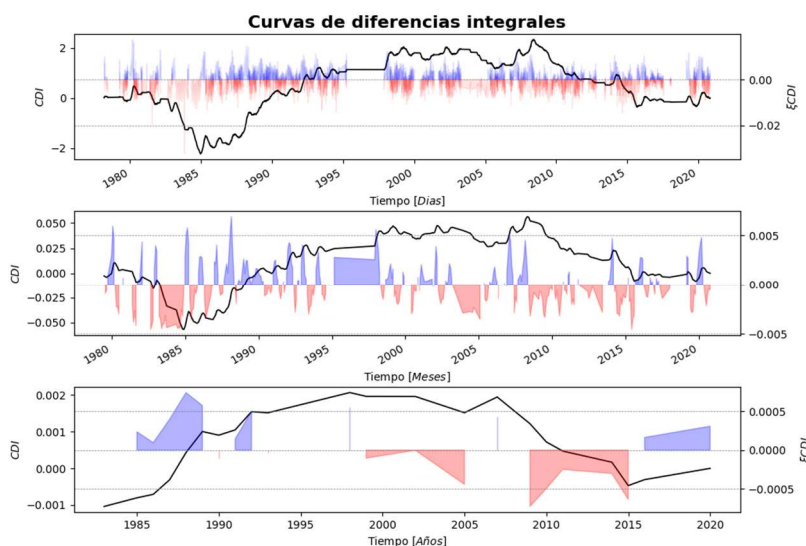
Figura 62. Resultado de curvas de diferencias integrales para la variable de precipitación total a escala diaria, mensual y anual.



Temperatura media

En la **Figura 63** se evidencia el resultado de los ciclos seculares calculados por medio de las curvas de diferencias integrales para temperatura media donde se identifican los resultados a nivel diario, mensual y anual. Se puede evidenciar patrones estacionales en todas las escalas de tiempo sin embargo para la escala mensual pueden estar relacionados estos ciclos con fenómenos climáticos estacionales como la influencia de masas de aire frío o cálido. Para la escala anual pueden ser cambios en la circulación atmosférica o variaciones climáticas a largo plazo.

Figura 63. Resultado de curvas de diferencias integrales para la variable de temperatura media a escala diaria, mensual y anual.



9.1.1.4.2 Desviación del patrón principal

La desviación del patrón principal se ve reflejada a través de la influencia que tienen fenómenos recurrentes en el comportamiento del proceso hidroclimático, estos fenómenos pueden variar con

respecto a la localización espacio temporal y a diferencia del patrón principal no están presentes en proceso per se. También esta desviación está enmarcada por un componente aleatorio que son aquellos elementos que obedecen al azar y que no pueden ser explicados a través de los demás elementos (Velasco Sánchez, 2016).

9.1.1.4.2.1 Fenómenos recurrentes

La dinámica climática en la VRO depende de factores geográficos, atmosféricos y oceanográficos, que interactúan entre sí. En ciertas circunstancias algunos eventos de variabilidad climática tienen un impacto significativo alterando variables como precipitación, temperatura y humedad y estos a su vez modificando dinámicas ecosistémicas, con el fin de establecer la afectación de fenómenos regionales como el Niño sobre el régimen climático de la cuenca, se determinó el grado de asociación lineal entre los distintos índices que monitorean las oscilaciones en el clima a nivel global y regional (NOAA), con series de precipitación y temperatura.

La identificación de la variabilidad climática y los fenómenos macroclimáticos se abordó desde un análisis de teleconexiones, el cual consiste en una serie de correlaciones cruzadas entre las series de precipitación y las de temperatura media, a resolución mensual, contra los índices océano- atmosféricos (ver **Tabla 29**).

Tabla 29. Índices océano atmosféricos

Metodología	Abreviación	Descripción
Índice Multivariado del ENSO	MEI	Variabilidad interanual del ENSO sobre el Pacífico Tropical
Índice de la Oscilación del Sur	SOI	Variabilidad interanual de la posición geográfica e intensidad de los centros de baja y alta presión sobre el Pacífico Sur Ecuatorial (ENSO).
Índice del Atlántico Norte/Sur tropical	TNA TSA	Variabilidad de la TSM en la parte tropical del Atlántico Norte/Sur
Índice de la Oscilación del Norte	ONI	Eventos climáticos tropicales (ENSO) y extratropicales sobre el Pacífico Norte
Índices del ENSO	NINO1+2	Efectos de la variabilidad interanual del ENSO sobre la TSM en distintas regiones del Pacífico Tropical.
	NINO3	
	NINO4	
	NINO3.4	

Fuente: NOAA (2018)

Para el análisis de resultados es importante aclarar que, en los gráficos, los números al interior de las celdas representan las correlaciones, de acuerdo con diferentes autores, una correlación significativa aquella mayor a 0.7, siendo rojo las correlaciones inversas y la azul las directas. El eje de las abscisas contiene los índices océano-atmosféricos y el de las ordenadas presenta los rezagos temporales.

La correlación directa o positiva se refiere a una relación estadística en la que dos variables cambian en la misma dirección, esto significa que cuando una variable aumenta, la otra variable también aumenta, o cuando una variable disminuye, la otra variable también disminuye. una correlación positiva entre la serie de tiempo de una variable climática y un índice océano atmosférico indicaría que las dos variables están relacionadas de manera positiva, ejemplo cuando el índice ENSO indica condiciones cálidas en el Pacífico, la temperatura de la región también tiende a ser cálida (de Leon, 2017; Glantz et al., 1991).

Por otro lado, la correlación inversa o negativa se refiere a una relación estadística en la que dos variables cambian en direcciones opuestas, esto significa que cuando una variable aumenta, la otra variable disminuye, o viceversa, ejemplo, si se observa una correlación negativa entre la precipitación en una región y un índice océano-atmosférico, cuando el índice indica condiciones secas, la precipitación de la región tiende a ser mayor (de Leon, 2017; Glantz et al., 1991).

A continuación, se presentan los resultados para la variable precipitación y temperatura, se toma como referencia la estación “Cumaribo” con código IDEAM 33055010, ubicada en Vichada.

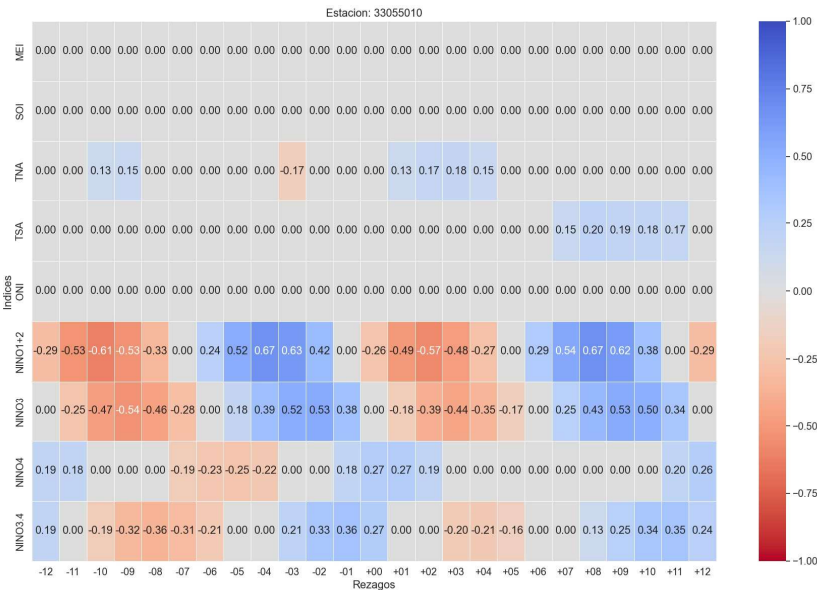
Precipitación total

En **Figura 64** se presentan los resultados del proceso de teleconexión para la variable precipitación, los resultados más relevantes se presentan en referencia con el índice Niño 1+2. En primer lugar, con una correlación directa o positiva de 0.67 en un rezago positivo +8, lo que indica una relación moderada fuerte entre las series evaluadas, esto podría sugerir, un aumento en las precipitaciones en la región cuando el índice sugiere una condición alta de humedad.

El rezago +8 sugiere que la serie de precipitación se desplaza hacia el futuro en ocho meses en relación con el índice océano-atmosférico. Es decir, en este caso, se está observando una correlación positiva entre una serie de tiempo y un índice, en la que los cambios donde se ubica la estación de monitoreo están asociados con los cambios en el índice océano-atmosférico ocho meses después.

Otra condición que se observa en índice Niño 1+2 y la precipitación, es una correlación de 0.67 en el rezago -4, lo cual sugiere que hay una relación moderadamente fuerte y negativa entre las dos variables. Es decir, cuando los valores del índice Niño 1 + 2 aumentan, los valores de la precipitación tienden a disminuir, y viceversa. El rezago de -4 indica que se está observando una correlación inversa en la que los cambios en la precipitación están relacionados con los cambios en el índice Niño 1 + 2 cuatro meses antes.

Figura 64. Resultados tele conexiones para precipitación total estación Cumaribo 33055010



Temperatura media

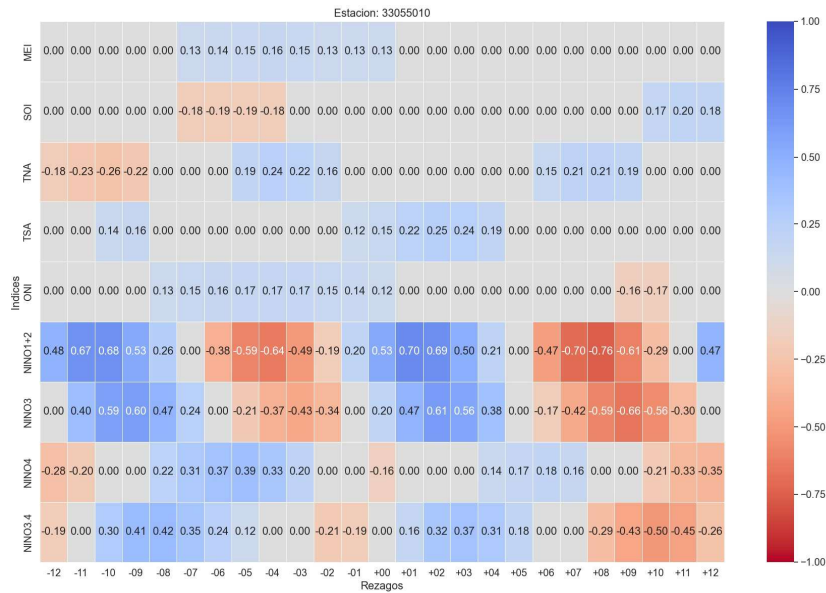
En la **Figura 65** se presenta el proceso de tele conexión con la estación Cumaribo para la variable temperatura, las correlaciones más representativas se describen a continuación:

Correlación positiva de 0.70 con rezago +1 indica que los cambios en la temperatura superficial en la cuenca del río Orinoco están asociados con los cambios en el índice Niño 1 + 2 un mes después. Una correlación positiva cercana de 0.68 con rezago -10 sugiere que los cambios en la temperatura superficial se relacionan con los cambios en el índice Niño 1 + 2 diez meses antes. Ambas correlaciones positivas

pueden indicar que el índice Niño 1 + 2 está influyendo en la temperatura superficial de la cuenca del río Orinoco.

Por otro lado, la correlación negativa de -0.76 con rezago +8 sugiere que los cambios en el índice Niño 1 + 2 están asociados con cambios opuestos en la temperatura superficial en la VRO ocho meses después, esta correlación negativa muestra que cuando el índice Niño 1 + 2 indica condiciones cálidas en el Pacífico, la temperatura superficial en la cuenca del río Orinoco tiende a ser más baja, y viceversa.

Figura 65. Resultados tele conexiones para temperatura media estación Cumaribo 33055010



9.1.1.4.2.2 Aleatoriedad

La aleatoriedad se enmarca en aquellos elementos que obedecen al azar y que no pueden ser explicados a través de los demás elementos.

En el componente aleatorio se realiza la caracterización del proceso hidroclimático como variable aleatoria, el objetivo aquí es el ajuste de la mejor función de distribución de probabilidad teórica que representa con menor error las observaciones registradas y, por lo tanto, su variabilidad (Domínguez Calle, 2018). Las funciones de probabilidad que se utilizan para el análisis se listan en la **Tabla 30**.

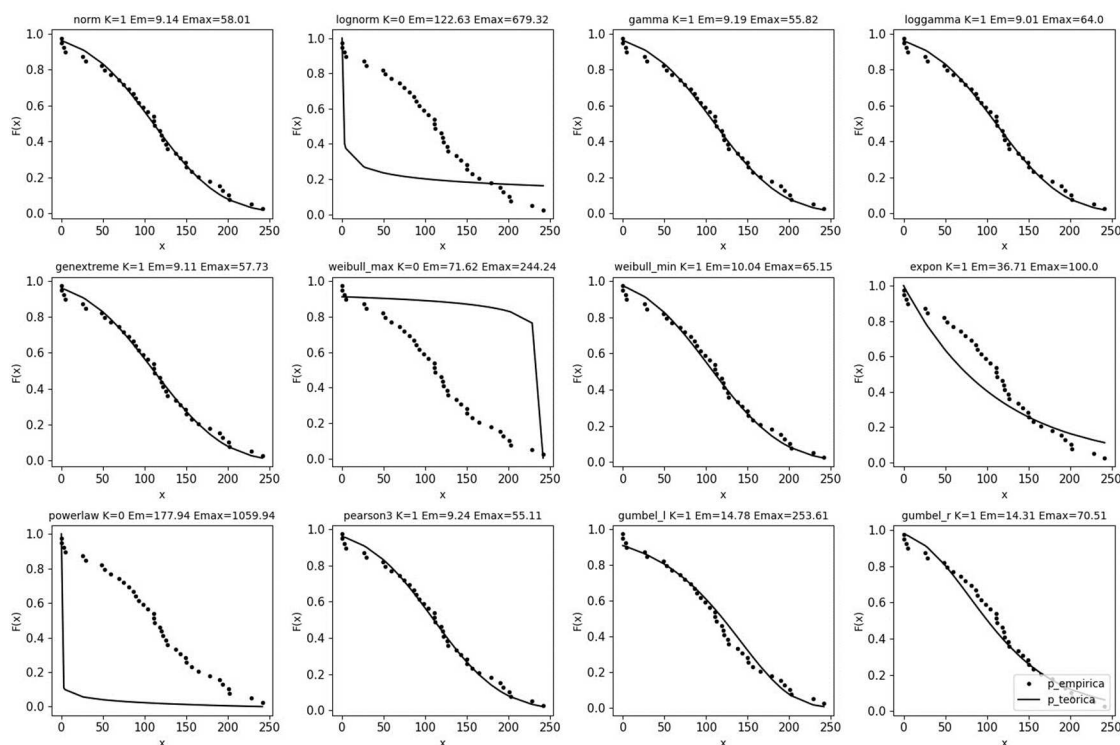
Tabla 30. Funciones de distribución de probabilidad teórica

Funciones de distribución de probabilidad	
Weibull_min	Norm
Expon	Lognorm
Powerlaw	Gamma
Pearson3	Loggamma
Gumbel_r	Genextreme
Gumbel_l	Weibull_max

Precipitación total

El análisis de aleatoriedad para precipitación total se realizan las 12 distribuciones de probabilidad para la estación Mandi (42050020) ubicada en Vaupés. Las distribuciones se utilizan para representar el ajuste de los datos y la descripción de la distribución de las precipitaciones en la zona. Con esto se pueden llegar a comprender patrones estacionales, tendencias entre otros. En el caso de esta estación las mejores distribuciones con respecto a los datos para el mes de noviembre son la Norm, Gamma, Loggamma, Genextreme, Pearson3 como se muestra en la **Figura 66**.

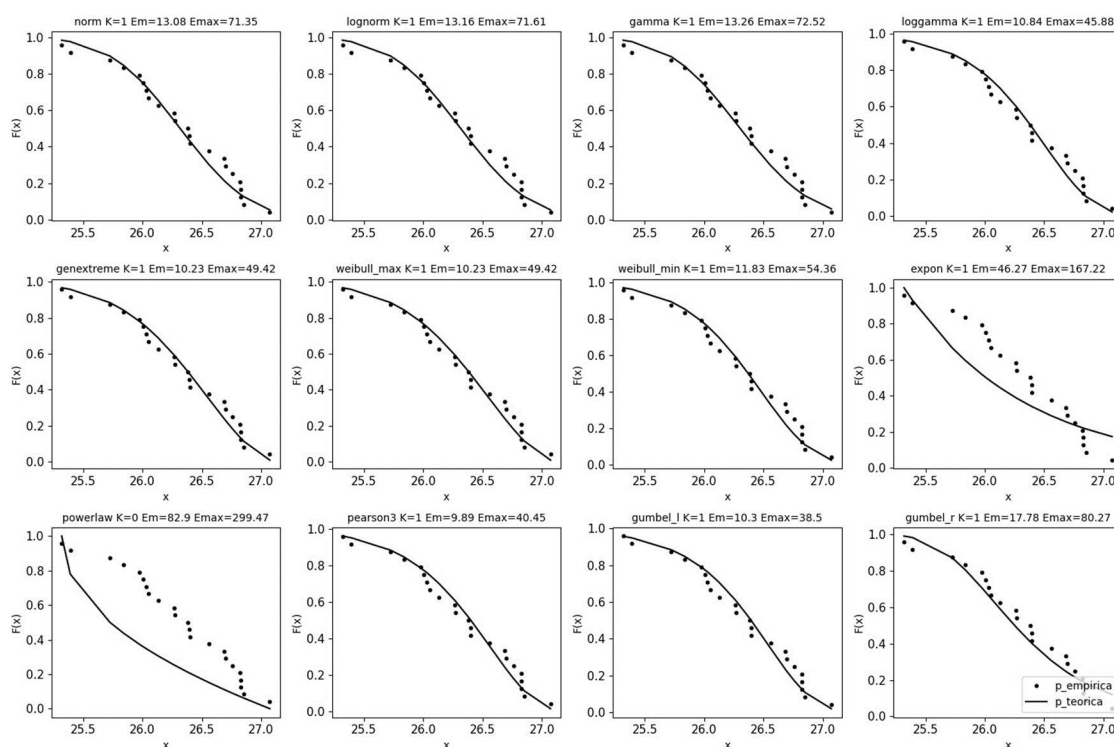
Figura 66. Resultado ajuste a funciones de probabilidad para precipitación total estación Mandi 42050020



Temperatura media

El análisis de aleatoriedad para temperatura media se realizan las 12 distribuciones de probabilidad para la estación Mapiripana (32155010) ubicada en Guaviare. Las distribuciones se utilizan para representar el ajuste de los datos y la descripción de la distribución de las precipitaciones en la zona. Con esto se pueden llegar a comprender patrones estacionales, tendencias entre otros. En el caso de esta estación las mejores distribuciones con respecto a los datos para el mes de noviembre son la Norm, Lognorm, Gamma, Loggamma, Genextreme, Weibull_min.

Figura 67. Resultado ajuste a funciones de probabilidad para temperatura media estación Mapiripana 32155010



9.1.2 Caracterización climática – Cambio climático

9.1.2.1 Sexto informe IPCC y escenarios SSP

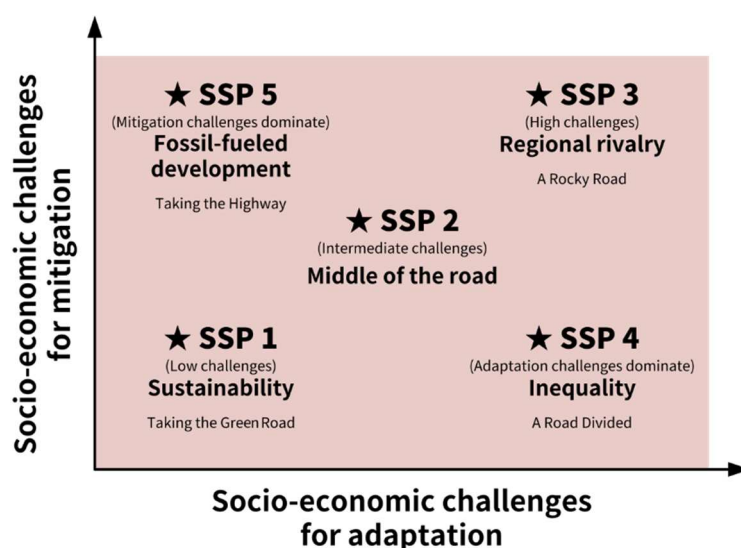
Con el objetivo de determinar las variaciones climáticas e hidrologías a largo plazo en la VRO, se presenta el análisis de cambio climático a partir de la información presentada en la sexta comunicación de cambio climático del IPCC, a continuación, se describe el marco conceptual y la metodología desarrollada.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), es el órgano principal para la evaluación del cambio climático el cual, examina y analiza las variaciones del clima y elabora informes científicos donde se consideran los futuros impactos y riesgos del cambio climático, además, propone diferentes escenarios con opciones de respuestas posibles tanto de mitigación como de adaptación, de manera que estos informes brindan información clave a la hora de tomar decisiones (Marco 2021).

El informe de la sexta comunicación del cambio climático publicado recientemente se elaboró con la finalidad de examinar el avance de los objetivos establecidos en el Acuerdo de París, en este informe se analizan cinco escenarios para los modelos de proyecciones climáticas (Marco, 2021). Los modelos climáticos globales (GCM), son herramientas de proyección que estiman el clima y el cambio climático futuro a partir de modelos numéricos que evalúan la concentración de gases de efecto invernadero (Pérez García & Menéndez García, n.d.).

Los escenarios de cambios socioeconómicos globales analizados son llamados trayectorias socioeconómicas compartidas por sus siglas en inglés (SSP), con proyecciones hasta el año 2100, estos escenarios se clasifican en, SSP1: sostenibilidad, SSP2: mitad del camino, SSP3: rivalidad regional, SSP4: desigualdad, SSP5: desarrollo impulsado por combustibles fósiles. Estos escenarios se describen de manera detallada a continuación.

Figura 68. Escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP)



SSP1: sostenibilidad (tomar el camino verde), Este escenario consiste en promover una gestión más eficiente de los bienes ambientales a nivel mundial, centrándose en lograr los objetivos del desarrollo sostenible por sus siglas en inglés (SDG), direccionando el crecimiento económico al bienestar humano y a la reducción del consumo tanto de recursos, energía y producción material.

SSP2: mitad del camino, En este escenario se proyecta un crecimiento poblacional moderado, un cumplimiento progresivo de los objetivos del desarrollo sostenible por parte de las instituciones mundiales y nacionales, algunas mejoras ambientales por una lenta disminución del consumo de recursos y una estabilización poblacional para la segunda mitad del siglo.

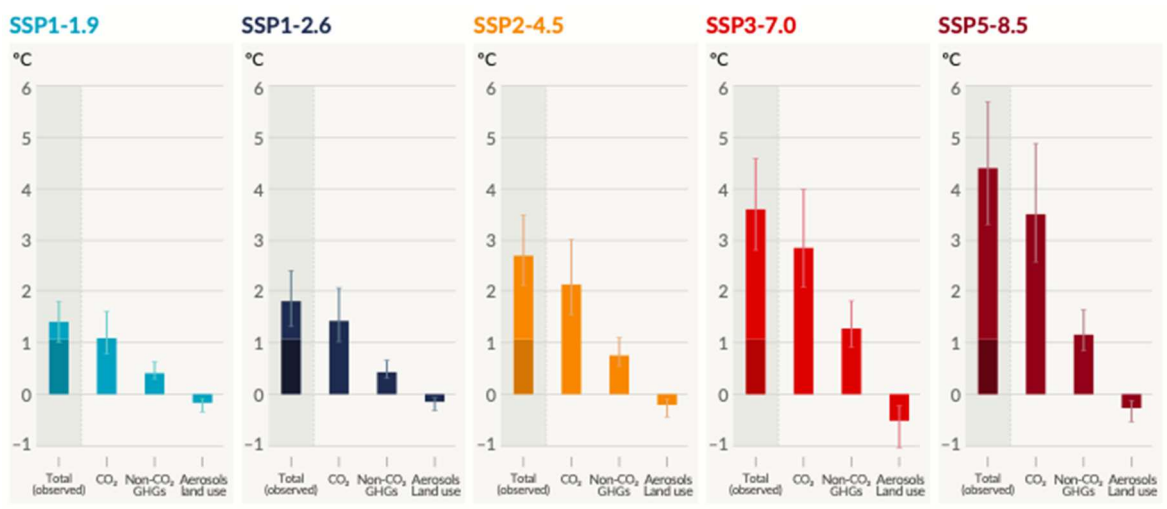
SSP3: rivalidad regional, En este escenario los países se centran en alcanzar los objetivos de seguridad energética y alimentaria, disminuyendo las inversiones en educación y desarrollo tecnológico, el crecimiento de la población es bajo en los países industrializados y alto en los países en desarrollo.

SSP4: desigualdad, En este escenario se presenta un aumento en las desigualdades, uso intensivo de mano de obra, poca tecnología y baja educación. Las políticas ambientales se centran en temas locales en áreas de ingresos medios y altos, el sector energético se diversifica en el carbono y el petróleo no convencional.

SSP5: desarrollo impulsado por combustibles fósiles, En este escenario se presentan grandes inversiones en salud, educación e instituciones con el objetivo de mejorar la mano de obra calificada encaminado al desarrollo sostenible. Por otro lado, un elevado consumo del sector energético, un crecimiento económico mundial y una disminución notable en la contaminación del aire.

Los SSP suministran la descripción de alternativas de crecimiento socioeconómico, proporcionando datos que contribuyen a los escenarios de urbanización, producto interno bruto (PIB) y población nacional. Como se mencionó anteriormente el informe analiza cinco escenarios, los escenarios con emisiones de GEI muy bajas o bajas (SSP1-1.9 y SSP1-2.6), altas o muy altas (SSP3-7.0 o SSP5-8.5) e intermedias (SSP2-4.5) (Marco, 2021). En la siguiente ilustración se presenta la relación entre los impulsores antropogénicos y el cambio de la temperatura global de la superficie (°C).

Figura 69. Contribución al aumento de la temperatura global de la superficie a partir de los diferentes escenarios



Fuente: Marco (2021)

De la **Figura 69** las barras y los bigotes representan los valores medianos y un rango de mayor probabilidad, en las gráficas se proyecta para cumplir con el objetivo del Acuerdo de París se deben seguir los escenarios bajos en emisiones de GEI (SSP1-1.9, SSP1-2.6), con el fin de no superar los 2°C para finales del año 2100, por otro lado, los escenarios de intermedias y altas emisiones de GEI (SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) sobrepasan los 2°C alcanzando temperaturas de hasta 5°C para finales del año 2100, lo anterior se define de acuerdo a trayectorias evaluadas de los años 1850 a 1900 proyectado al año 2100 (Pérez García & Menéndez García, n.d.).

9.1.2.2 Modelos de circulación global

Los Modelos de Circulación Global (GCM) son considerados la mejor herramienta para analizar y estudiar los cambios climáticos según el IPCC, puesto que se basan en la parametrización de procesos, leyes físicas de la atmósfera, los movimientos de las masas de aire, formación de nubosidad, efectos del océano y entre otros. En la Conferencia Sobre el Cambio Climático (COP 26) se subraya la importancia de al menos 100 modelos climáticos que fueron realizados por aproximadamente 49 grupos de investigación.

Con el fin establecer un análisis que abarque todas las posibilidades de cambio en las dinámicas climáticas para el área de estudio, se tuvieron en cuenta siete modelos que contemplan procesos ecosistémicos, dinámicas en ciclos biogeoquímicos, crecimientos demográficos y aumento en gases de efecto invernadero, A continuación, se describen los modelos utilizados:

ACCESS-ESM1-5: Modelo del sistema terrestre australiano, es utilizado para generar un conjunto de condiciones en las simulaciones de los cuatro escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 Y SSP5-8.5. el modelo utiliza ecuaciones matemáticas complejas para simular la dinámica de la atmósfera, el océano y la criosfera (hielo marino y glaciares). También considera el efecto de la interacción entre estos componentes y la interacción con la superficie terrestre, como la vegetación, la topografía y las emisiones de gases de efecto invernadero. El modelo también tiene en cuenta los ciclos biogeoquímicos del carbono, el nitrógeno y otros gases de efecto invernadero, lo que le permite simular los efectos del cambio climático en la química de la atmósfera y el océano (Ziehn et al., 2020).

CANES M5: Modelo del sistema terrestre canadiense versión 5, es un modelo global desarrollado para simular el cambio climático histórico y la variabilidad, genera proyecciones a escala centenaria del clima futuro y predicciones estacionales y decenales inicializadas, considera el efecto de la interacción entre la

atmósfera, el océano y la criosfera y la interacción con la superficie terrestre, como la vegetación, la topografía y las emisiones de gases de efecto invernadero (Swart et al., 2019)..

El modelo tiene una resolución espacial de aproximadamente 50 kilómetros para la atmósfera y 25 kilómetros para el océano. Esto significa que el modelo divide la Tierra en una cuadrícula de celdas y realiza cálculos para cada celda individualmente, lo que le permite simular patrones climáticos complejos a nivel global (Swart et al., 2019).

CESM2 (Community Earth System Model 2): El Modelo del Sistema Terrestre Comunitario Versión 2 (CESM2), tiene una resolución espacial de aproximadamente 100 kilómetros para la atmósfera y 60 kilómetros para el océano. Utiliza ecuaciones matemáticas complejas para simular la dinámica de la atmósfera, el océano, la criosfera (hielo marino y glaciares) y la biogeoquímica terrestre (vegetación, ciclos de carbono y nitrógeno, adicionalmente el modelo tiene en cuenta los procesos de retroalimentación climática, que pueden afectar la rapidez y la magnitud del cambio climático. Puede simular cómo el calentamiento global podría afectar la capa de hielo y el albedo, que a su vez afecta la cantidad de energía solar que se refleja en la Tierra y la cantidad de energía solar que se absorbe (Gettelman et al., 2019).

EC-Earth3: Es un modelo de sistema terrestre modular (ESM) desarrollado en colaboración por el consorcio europeo con el mismo nombre. La generación actual del modelo, EC-Earth3, se desarrolló después de CMIP5, y la versión 3.3 se utiliza para los experimentos de CMIP6 (Döscher et al., 2022).

El modelo acopla múltiples componentes del sistema terrestre, incluyendo la atmósfera, el océano, la criosfera (hielo marino y glaciares), la biosfera (vegetación) y la química atmosférica, permite simulaciones con emisiones forzadas en lugar de con concentraciones prescritas e incluye ciclos del carbono y el nitrógeno. Utiliza una alta resolución espacial para la atmósfera y el océano, con una resolución de aproximadamente 80 kilómetros para la atmósfera y 25 kilómetros para el océano (Döscher et al., 2022).

MIROC 6: Es un modelo climático global MIROC (Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima), desarrollado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Japón, el Instituto de Investigación sobre el Clima y la Globalización de Japón, el Centro de Investigación de Modelado de la Tierra de la Universidad de Tokio y otros colaboradores internacionales. Es un modelo numérico para describir la atmósfera tridimensional global basado en leyes físicas y calcular la evolución temporal del sistema climático como un problema de valor inicial o un problema de valor límite. (Ando et al., 2021).

Tiene una resolución espacial de aproximadamente 100 kilómetros para la atmósfera y 50 kilómetros para el océano, una característica especial del modelo climático MIROC6 es que incluye una representación detallada de la química atmosférica, lo que le permite simular la formación y el transporte de gases y partículas atmosféricas, como ozono, aerosoles y compuestos orgánicos volátiles (Ando et al., 2021).

MPI-ESM1-2-L: Es un modelo de circulación general (GCM) desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología en Alemania. Este modelo se utiliza para estudiar el clima terrestre y simular cómo podría cambiar en el futuro debido a diferentes factores, como el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Es un modelo que consta de cuatro componentes y un acoplador que están conectados al modelo de atmósfera, utiliza un modelo de vegetación dinámico para simular la interacción entre la vegetación y la atmósfera. Esto significa que el modelo puede simular cómo el cambio climático afecta la distribución y la productividad de la vegetación, lo que a su vez puede afectar la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera (Mauritsen et al., 2019).

MRI-ESM2-0: El Modelo del Sistema Terrestre del Instituto de Investigación Meteorológica (MRI-ESM2-0) es un modelo de circulación general (GCM) que consta de cuatro modelos componentes

principales: un modelo de circulación general atmosférica con procesos terrestres (MRI-AGCM3.5), un modelo de circulación general océano-mar-hielo (OGCM), un modelo de transporte químico de aerosoles y un modelo de química atmosférica.

Utiliza un acoplador para acoplar interactivamente cada modelo componente en MRI-ESM2.0; esto permite una representación explícita de los efectos de los gases y aerosoles en el sistema climático (por ejemplo, las interacciones de los aerosoles con la radiación, las nubes y el albedo superficial de la nieve y el hielo) (Yukimoto et al., 2020).

9.1.2.3 Escenarios de cambio climático

En el presente estudio se emplearán para los diferentes análisis, cuatro escenarios climáticos con series de tiempo de precipitación total diaria, temperatura media y evapotranspiración potencial, a continuación, se describen los escenarios:

- **SPP1-2.6:** escenario de emisiones bajas de GEI. Es poco probable que se supere el calentamiento global de 2 °C.
- **SPP2-4.5:** escenario de emisiones intermedias de GEI. Es muy probable que se supere el calentamiento global de 2 °C.
- **SPP3-7.0:** escenario de emisiones altas o muy altas de GEI. Es probable que se supere el calentamiento global de 2 °C.
- **SPP5-8.5:** escenario de emisiones muy altas de GEI. Es probable que se supere el calentamiento global de 2 °C.

9.1.2.4 Downscaling – corrección de sesgo

Los GCM son herramientas importantes para simular el clima global y hacer predicciones sobre cómo podría cambiar el clima en el futuro. Sin embargo, debido a su resolución espacial relativamente baja, los modelos GCM no pueden proporcionar información detallada sobre los patrones climáticos a nivel regional o local. Por tal motivo es necesario utilizar un proceso de downscaling para obtener información climática detallada a nivel regional o local. El downscaling es un proceso que utiliza datos de los modelos GCM y los ajusta para proporcionar información climática detallada a escalas más pequeñas, en este caso información de estaciones para la VRO.

El método seleccionado en este proyecto corresponde a la técnica estadísticas de “corrección de sesgo y desagregación estadística (BCSD)” se utilizan ampliamente para acoplar modelos de circulación general (GCM) e información climática. El método de corrección de sesgo reduce la diferencia entre los valores observados y los valores simulados mediante la aplicación de un factor de ajuste a los datos simulados por modelos de circulación global, la expresión general se presenta a continuación:

$$X_{i,j}^* = \alpha_j X_{i,j}^{GCM}$$

donde $X_{i,j}^*$ representa el valor ajustado de la variable x del año i-esimo y del mes j-esimo, $X_{i,j}^{GCM}$ representa el valor ajustado de la variable x del año i-esimo y del mes j-esimo; y α_j representa el factor de ajuste para el mes j-esimo (Gupta et al., 2019; Ratri et al., 2019).

El factor de ajuste α_j se calcula a partir de la expresión:

$$\alpha_j = \frac{X_j^{Obs}}{X_j^{GCM}}$$

Donde X_j^{Obs} corresponde al promedio de la serie de datos observados para el mes j-esimo, y X_j^{GCM} indica el promedio de las series asociadas a los escenarios de cambio climático para el mes j-esimo.

Con el fin de establecer los posibles cambios en los patrones climáticos en la VRO, el análisis se realiza teniendo en cuenta diferentes metodologías, en primer lugar, se presenta el comportamiento anual de las diferentes series evaluadas para la variable temperatura y precipitación total en periodo de tiempo de 1980 hasta 2050. En segundo lugar, se evalúan los cambios en el comportamiento estacional en los diferentes escenarios de cambio climático, para esto se estima el primer momento estadístico de los modelos y sus respectivos escenarios climáticos.

9.1.2.5 *Análisis escenarios cambio climático*

Una vez generado el proceso de selección de series de tiempo, downscaling para cada uno de los modelos mencionados anteriormente y los diferentes escenarios, se procede a agregar la información a escalas mensuales y anuales, con el objetivo de identificar los posibles cambios en los patrones y tendencias a largo plazo.

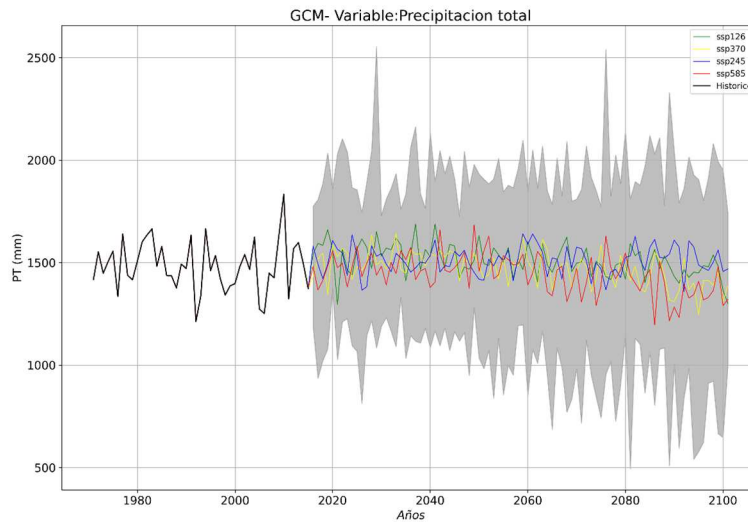
Es necesario mencionar que el proceso se realizó tomando como referencia todas las estaciones climáticas mencionadas en capítulo de Clima histórico, siendo así, se generaron por cada ubicación espacial y cada variable un total de 28 series de tiempo (7 modelos GCM con 4 escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas) para el periodo de tiempo de 2015 a 2100.

Precipitación

En la **Figura 70** se presenta el comportamiento a largo plazo de la precipitación total anual de los diferentes escenarios tomando como referencia en el proceso de downscaling para la estación Vuelta Mala con código IDEAM 35260050, ubicada en Casanare, la franja en color gris corresponde a todas las posibles realizaciones de las 28 series correspondientes a los diferentes modelos, en color negro se presenta la serie histórica, en color verde se observa la condición media del escenario SSP 1-2.6, color azul el escenario SSP 2-4.5, color amarillo el escenario SSP 3-7.0 y en color rojo el escenario SSP 5-8.5.

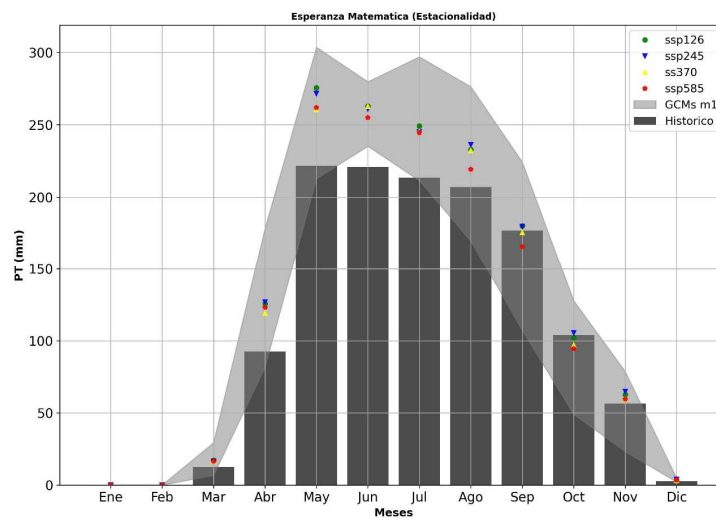
En la gráfica se observa una dinámica típica de la variable precipitación hasta el periodo de 2050 donde se identifican fluctuaciones con temporadas de alta y baja humedad. Para el periodo de 2060 a 2100 se puede observar una mayor recurrencia de series de tiempo que presentan bajos valores de precipitación llegando a un mínimo de 1100 mm/año, estas condiciones podrían generar alteraciones en diferentes regímenes naturales. En conclusión, la dinámica anual evidencia una tendencia decreciente del comportamiento de la variable precipitación.

Figura 70. Comportamiento anual de la precipitación para la estación Vuelta Mala 35260050



La siguiente **Figura 71** presenta el comportamiento a largo plazo para la precipitación total a escala mensual (condición estacional) teniendo en cuenta los diferentes escenarios tomando como referencia la estación Vuelta Mala 35260050 ubicada en Casanare. La franja de color gris corresponde a las posibles realizaciones de las 28 series correspondientes a los siete modelos, las barras hacen referencia al comportamiento histórico de la estación, en color verde se observa la condición media del escenario SSP 1-2.6, color azul el escenario SSP 2-4.5, color amarillo el escenario SSP 3-7.0 y en color rojo el escenario SSP 5-8.5.

Figura 71. Comportamiento estacional de la precipitación para la estación Vuelta Mala 35260050



Esta gráfica representa el comportamiento estacional en los escenarios de cambio climático y su relación con la estacionalidad de la condición histórica observada, se observa como gran parte de los meses sobrepasa la condición histórica en todos los escenarios, sugiriendo cambios a largo plazo en las fluctuaciones de precipitación, otro punto importante es el posible desplazamiento de la condición máxima, los escenarios sugieren un periodo de máximas precipitaciones en el mes de Mayo, sugiriendo una condición anticipada a la que se presenta actualmente con máximos en los meses de junio y julio.

Otra condición que se observa es en los últimos meses del año (septiembre a diciembre) corresponde a escenarios como el SSP245 Y SSP 126 mantienen la magnitud de la variable en relación con el comportamiento histórico, escenarios como el SSP370 y SSP 584 presentan una disminución respecto a la condición histórica.

Es importante resaltar que estos resultados corresponden a escenarios de cambio climático de múltiples modelos de circulación global con altos porcentajes de incertidumbre, sin embargo, pueden mostrar un conjunto de posibilidades a futuro bajo consecuencia de aquellas presiones sobre la dinámica climática en el Orinoco.

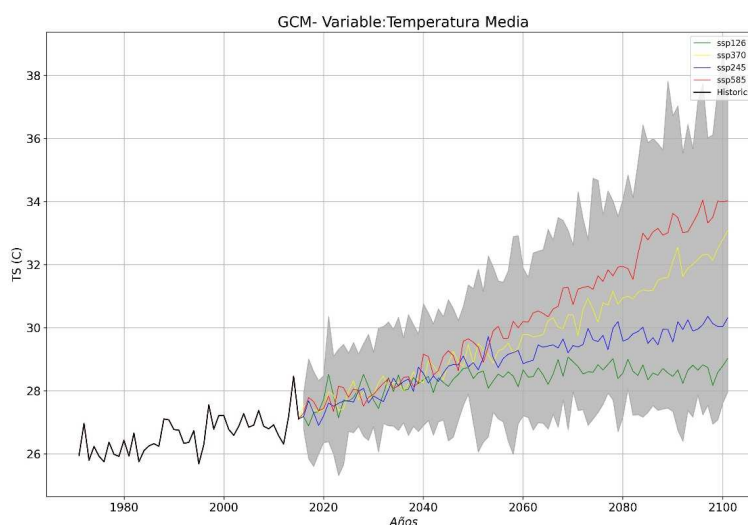
Temperatura

En la **Figura 72** se presenta el comportamiento a largo plazo de la variable temperatura para la estación Paz de Ariporo 36015010, se identifica una tendencia creciente, la amplitud de las realizaciones presenta valores entre los 26 a 35°C.

Referente a la condición media de los escenarios de cambio climático, las cuatro condiciones presentan un aumento de temperatura llegando a un máximo de 35°C, alcanzando estas temperaturas para el periodo entre 2090 a 2100 para la condición extrema que es el SSP5-8.5. Evidenciando para todos los escenarios un aumento significativo respecto a la condición histórica o típica de la estación.

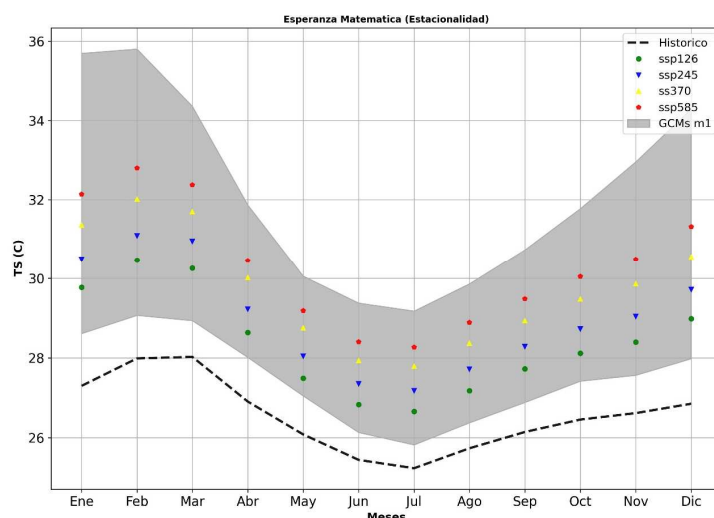
A una resolución anual se observa claramente la diferencia entre los diferentes escenarios y la condición histórica, es claro el escenario más conservador corresponde al SSP 126 Y al SSP 245, sin embargo, estos presentan aumentos anuales respecto a la condición histórica de aproximadamente 2°C.

Figura 72. Comportamiento anual de la precipitación para la estación Paz de Ariporo 36015010



La **Figura 73** presenta el comportamiento estacional de la temperatura a escala mensual teniendo de referencia el comportamiento histórico y entender como son las dinámicas a largo plazo por cada escenario de cambio climático para la estación Paz de Ariporo 36015010, se puede evidenciar que las condiciones para todos los meses teniendo en cuenta los escenarios, superan la condición histórica significativamente. Lo correspondiente a los meses de enero a marzo son los que tienen comportamientos más extremos si se tiene de referencia las condiciones normales de la estación.

Figura 73. Comportamiento estacional de la precipitación para la estación Paz de Ariporo 36015010



9.1.2.6 Ensemble climático

El proceso de ensemble climático en este caso de 7 modelos de circulación global (GCM) tiene como objetivo la combinación y ponderación con la metodología de ensemble RAE (reliability ensemble averaging) de las proyecciones de temperatura y precipitación de los modelos por los cuatro escenarios de cambio climático definidos.

Es importante aclarar que se hacen cuatro ensambles debido a que son cuatro escenarios (SPP1, SPP2, SPP3, SPP5).

9.1.2.6.1 Metodología RAE (Reliability Ensemble Averaging)

El método REA se basa en el cálculo de la media, el rango de incertidumbre y una medida de fiabilidad de los cambios climáticos simulados a escala subcontinental a partir de conjuntos de diferentes simulaciones de modelos de circulación global, aplicado a los cambios estacionales de temperatura y precipitación basándose en la ponderación de los resultados de los modelos según su desempeño histórico y la capacidad para representar condiciones climáticas (Xu et al., 2010).

Este método tiene en cuenta dos criterios, el rendimiento del modelo en la reproducción del clima actual y la convergencia de los cambios simulados entre modelos. Estos criterios se describen a continuación.

- Cálculo de convergencia

El factor de convergencia cuantifica cuanto concuerdan las predicciones de un modelo con las predicciones de los otros modelos evaluados. Para el cálculo de este factor se toma la diferencia absoluta entre las predicciones de un modelo y las predicciones de todos los otros modelos para cada punto en el tiempo para así promediar estas diferencias (Xu et al., 2010).

$$Convergencia = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}$$

Donde:

P_i = Predicciones del modelo

$\bar{P}$ = Promedio de las predicciones de todos los modelos

- Cálculo de desempeño

El factor de desempeño evalúa la alineación de las predicciones históricas de los modelos con las observaciones reales, dentro de este factor se puede utilizar el inverso del error cuadrático medio para medir el rendimiento. Entre más pequeño sea el resultado del MSE indica la existencia de un mejor rendimiento.

$$\text{Desempeño} = \frac{1}{MSE} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

Donde:

P_i = Predicciones del modelo

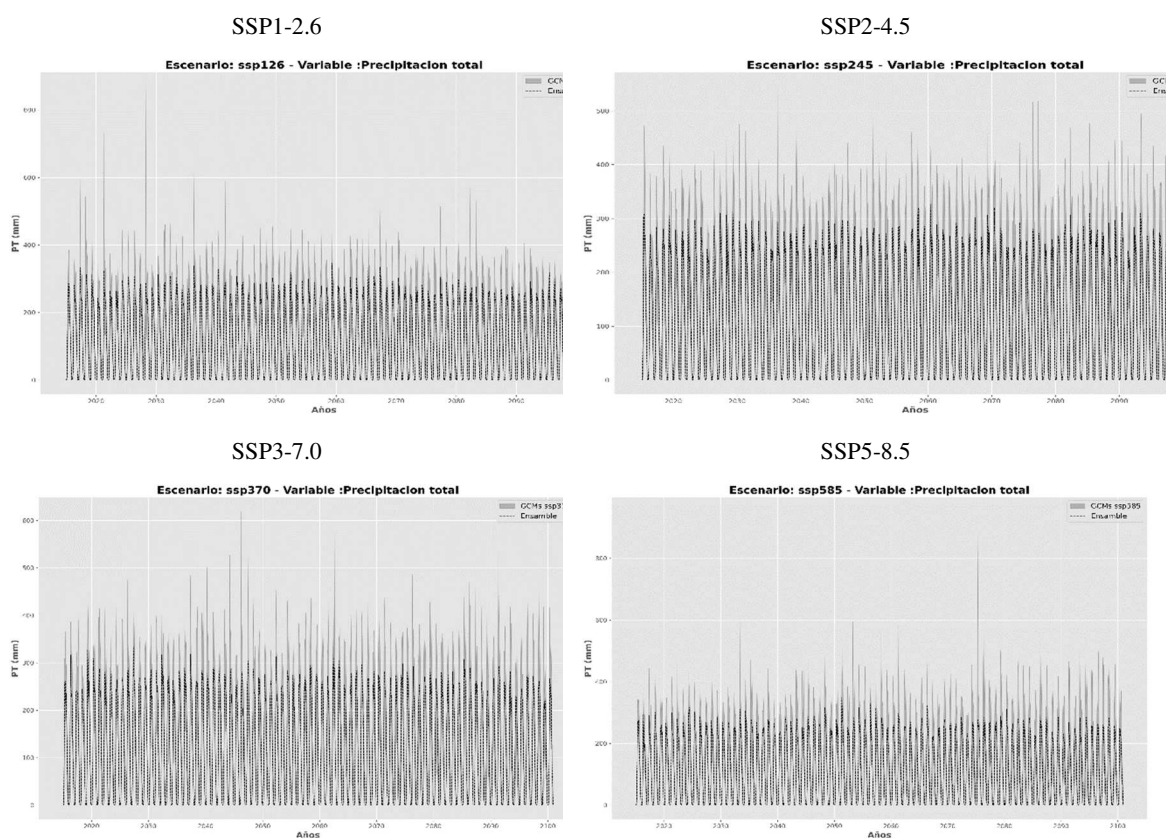
O_i = Observaciones reales

Al realizar el cálculo de ambos factores convergencia y rendimiento, se asigna un peso a cada modelo con la combinación de estos factores, teniendo en cuenta que si el rendimiento y la convergencia del modelo son altos obtendrá un peso más alto. Con esto las predicciones de todos los modelos se combinan según el peso calculado para generar el ensamble único final tanto de la variable de precipitación como de temperatura.

Ensamble Precipitación

Se muestra en la **Figura 74** el resultado del ensamble para la variable de precipitación por cada escenario elegido para la VRO, cada gráfica por escenario muestra el comportamiento de los siete modelos de circulación global en la escala de gris y el resultado del ensamble de estos siete modelos se identifica por la línea negra punteada. En esto se puede evidenciar como el ensamble muestra un comportamiento uniforme al que muestran los GCMs. Al observar el comportamiento del ensamble para los 4 escenarios se puede evidenciar que la precipitación presentará condiciones extremas en el rango de 200 a 300 mm, lo que podría entenderse como un aumento no extremo a las condiciones observadas.

Figura 74. Resultado ensamble para la variable de precipitación por los cuatro escenarios de cambio climático

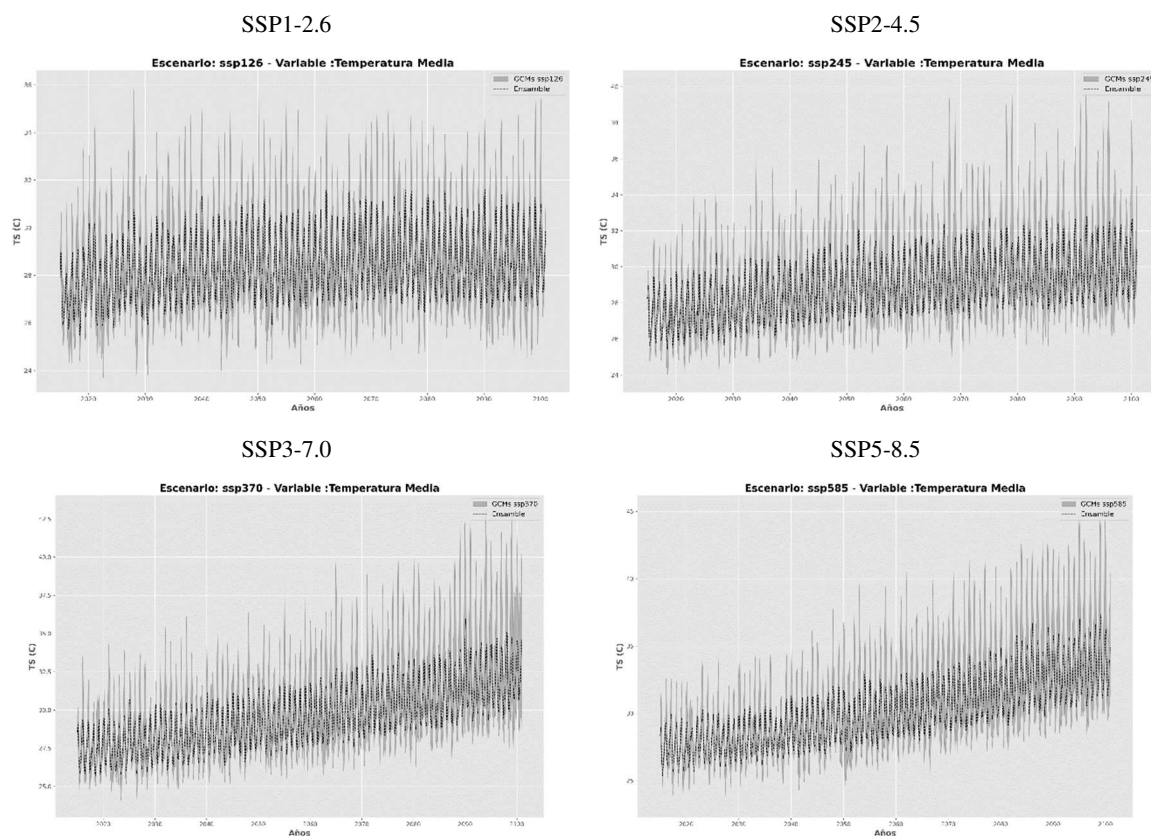


Ensamble Temperatura

Se muestra en la **Figura 75** el resultado del ensamble para la variable de temperatura por cada escenario elegido para la VRO, cada gráfica por escenario muestra el comportamiento de los siete modelos de circulación global en la escala de gris y el resultado del ensamble de estos siete modelos se identifica por la línea negra punteada.

Lo que se evidencia de las gráficas es el aumento en la temperatura pasando de una condición de 31°C para el escenario SSP1 a 37°C para el escenario más extremo siendo el SSP5. Las condiciones para el escenario SSP2 sería una temperatura máxima de 33°C y por último el escenario SSP3 alcanzando los 36°C.

Figura 75. Resultado ensamble para la variable de temperatura por los cuatro escenarios de cambio climático



9.1.2.6.2 Distribución espacial condición anual cambio climático

Tomando como referencia los resultados del ensamble climático se precede a estimar los diferentes momentos estadísticos con el fin de establecer un análisis comparativo entre los diferentes escenarios para las variables precipitación y temperatura, en términos generales se presenta la condición anual de las variables, en el proceso de interpolación para la precipitación se empleó el método IDW y en el caso de la temperatura el gradiente térmico y gradiente altitudinal.

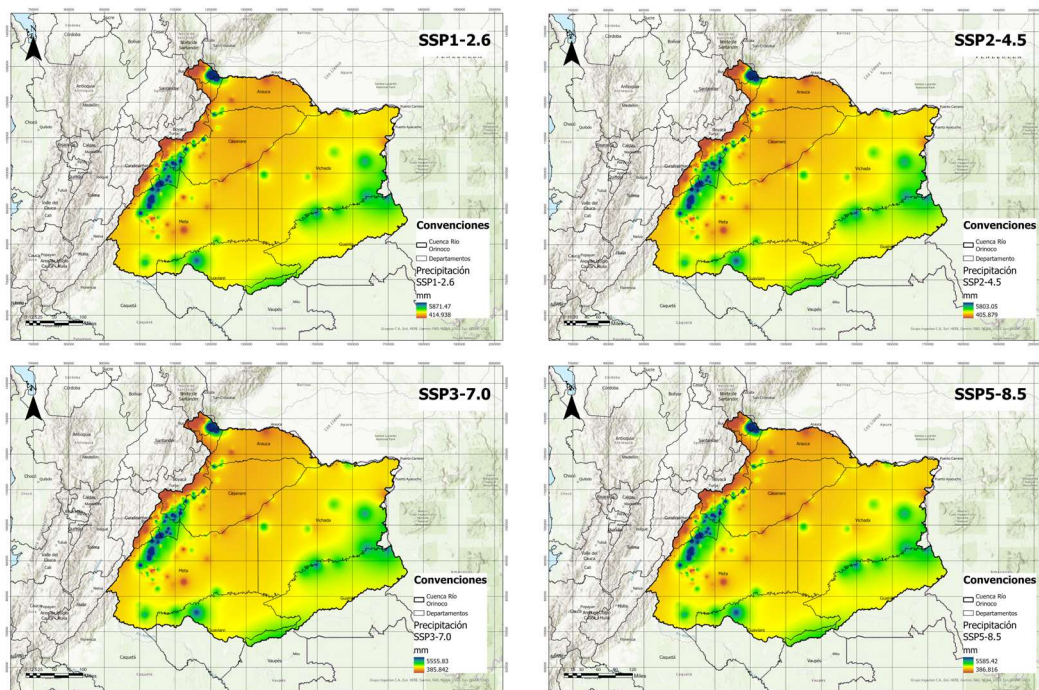
Distribución Precipitación

En la **Figura 76** se presenta la distribución de la precipitación en los cuatro escenarios evaluados, de los resultados es posible abordar los siguientes análisis:

- **Variación:** Los mapas muestran una clara variación en los patrones de precipitación anual, con diferentes regiones experimentando incrementos o disminuciones según el escenario. Las áreas más afectadas parecen se asocian hacia la cordillera de los antes en los límites entre la sabana y el pie de monte, donde hay una mayor concentración de puntos verdes y rojos, indicando variación en la precipitación.
- **Intensidad y distribución:** La intensidad de la precipitación (indicada por la escala de colores) y su distribución geográfica cambian significativamente entre escenarios. En escenarios más severos (SSP3-7.0 y SSP5-8.5), la distribución de la precipitación es más irregular y presenta mayores extremos (zonas con mucha más o mucha menos precipitación), lo que sugiere mayores desequilibrios hidrológicos.

- **Impactos potenciales:** Las diferencias en la precipitación entre los escenarios pueden tener impactos significativos en la agricultura, la gestión de recursos hídricos, y la biodiversidad de las regiones afectadas.
 - Variaciones en los patrones de lluvia pueden afectar directamente la producción agrícola. Las áreas que dependen de la lluvia para la agricultura pueden sufrir períodos de sequía o inundaciones, que podrían reducir los rendimientos de los cultivos y afectar la seguridad alimentaria.
 - Un cambio en la estacionalidad de las lluvias podría requerir la adaptación de las prácticas agrícolas, como el cambio de fechas de siembra y cosecha o la selección de variedades de cultivos más resistentes a las condiciones cambiantes
 - Las regiones que muestran una disminución en la precipitación pueden enfrentar escasez de agua, afectando el suministro para el consumo humano, la industria y la agricultura.
 - Los cambios en los regímenes de precipitación pueden alterar los hábitats naturales, afectando la biodiversidad. Algunas especies pueden verse amenazadas por la alteración de los ecosistemas acuáticos y terrestres

Figura 76. Distribución espacial precipitación anual para escenarios cambio climático



Distribución Temperatura

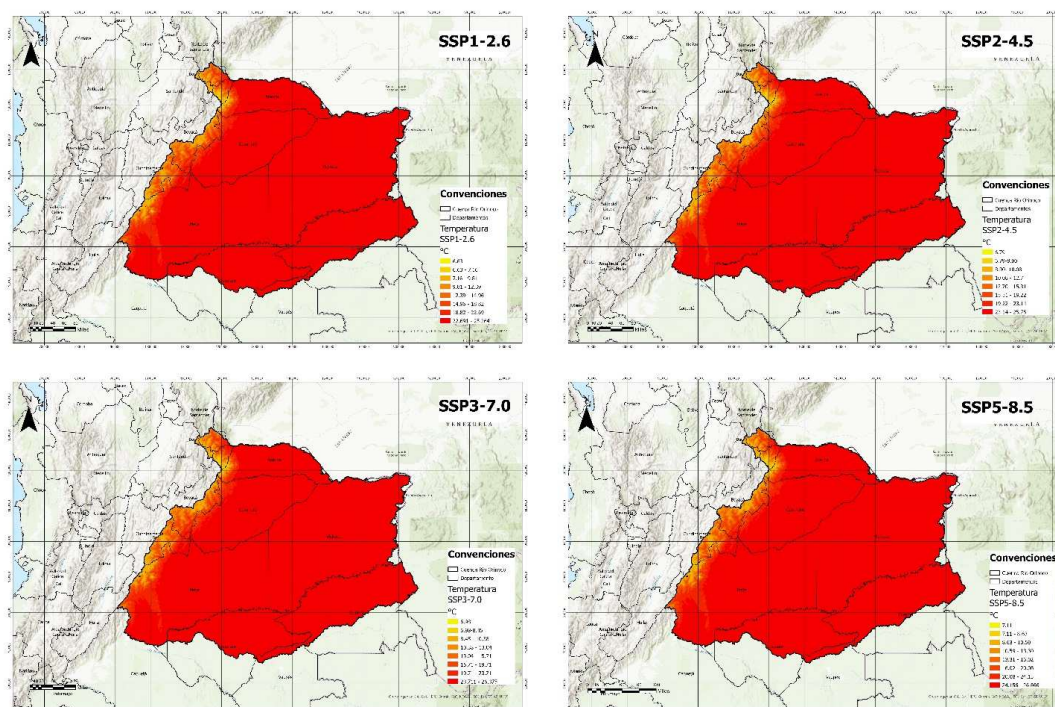
Respecto a la variable temperatura, a continuación, se presenta la distribución espacial de la condición media anual, algunas consideraciones observadas del análisis:

- **Aumento de la temperatura:** Todos los escenarios muestran un aumento en la temperatura media, pero la magnitud de este aumento varía. Los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5, que asumen mayores emisiones de gases de efecto invernadero, muestran un aumento más pronunciado en las temperaturas.
- **Distribución espacial:** El patrón de calentamiento no es uniforme a través de la región, con algunas áreas, especialmente las internas y las zonas montañosas, experimentando mayores

aumentos de temperatura, la escala de colores indica que, a medida que se mueve de SSP1-2.6 a SSP5-8.5, hay un cambio progresivo hacia temperaturas más altas, lo cual es consistente con la intensificación de los efectos del cambio climático bajo escenarios de mayores emisiones.

- **Impactos potenciales:** los impactos del cambio en la temperatura pueden estar representados en componentes sociales, económicos y bióticos, algunas consideraciones se describen a continuación:
 - Estrés térmico: Las temperaturas más altas pueden llevar a olas de calor más frecuentes e intensas, lo que afecta la salud humana y puede causar la muerte de especies vulnerables.
 - Agricultura: El estrés térmico puede reducir los rendimientos de los cultivos, afectar la ganadería y requerir cambios en las prácticas agrícolas.
 - Consumo de energía: Es probable que aumente la demanda de energía para refrigeración, lo que puede poner a prueba la capacidad de las redes eléctricas, especialmente durante las olas de calor.
 - Ciclos de agua: Los aumentos de temperatura pueden alterar los patrones de precipitación y aumentar la evaporación, afectando la disponibilidad de agua.
 - Nivel del mar: El calentamiento global contribuye al deshielo de los glaciares y casquetes polares, lo que puede elevar el nivel del mar y afectar a las comunidades costeras.
 - Biodiversidad: Los ecosistemas pueden alterarse dramáticamente con el cambio de temperatura, llevando a cambios en la distribución de las especies y posibles extinciones.

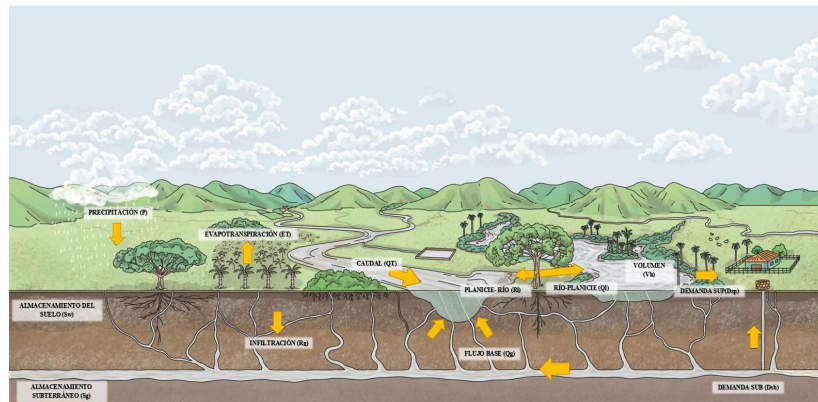
Figura 77. Distribución espacial de la temperatura para escenarios cambio climático



9.1.3 Modelo matemático hidrológico

MoHiTo (herramienta de modelación hidrológica para la toma de decisiones) surge de la necesidad de entender cómo se vería afectado el recurso hídrico en la vertiente del Orinoco colombiano ante futuras presiones de los diferentes sectores hidro dependientes (Nogales et al., 2021). MoHiTo emplea un esquema de modelación espacial semidistribuido con paso de tiempo de mensual. El modelo resuelve el balance hídrico haciendo uso de las expresiones propuestas por (Thomas, 1981). De acuerdo con esto, MoHiTo considera dos compartimentos para el análisis del balance hídrico: el suelo o zona de evapotranspiración con almacenamiento Sw , y la zona saturada con almacenamiento Sg (ver **Figura 78**). Para efectos de modelación, la componente de flujo subsuperficial en la parte superficial de la zona de evapotranspiración se puede incluir en la escorrentía directa (Ro). El modelo considera despreciable el flujo lateral profundo ($Qlat$) en la zona no saturada, de tal forma que la recarga potencial (infiltración) es igualada a la recarga real (Rg).

Figura 78. Esquema conceptual del modelo MoHiTo



Fuente: Adaptado Nogales et al. (2021)

De esta forma, aplicando la ecuación de continuidad a un volumen de control Sw , se tiene:

$$P_i - ET_i - Rg_i - Ro_i = \Delta Sw = Sw_i - Sw_{i-1}$$

Donde P_i es la precipitación; ET_i , la evapotranspiración real; Rg_i , la recarga; Ro_i , la escorrentía directa; ΔSw , el cambio en el almacenamiento del suelo entre el período de cálculo i (Sw_i) y el período inmediatamente anterior (Sw_{i-1}). Thomas Jr (1981) definen además las variables W_i (agua disponible) e Y_i como:

$$W_i = P_i + Sw_{i-1}$$

$$Y_i = ET_i + Sw_{i-1}$$

En cada intervalo de tiempo se asume que la humedad disminuya según la ley de decaimiento exponencial, asumiendo como humedad inicial al comienzo de cada intervalo Y_i , donde ETP_i es la evapotranspiración potencial y b , es un parámetro del modelo:

$$Sw_i = Y_i * e^{-\frac{ETP_i}{b}}$$

Thomas Jr (1981), define la variable de estado Y_i como una función no lineal del agua disponible según los parámetros a (adimensional) y b :

$$Y_i = \frac{W_i + b}{2a} - \left[\left(\frac{W_i + b}{2a} \right)^2 - \frac{W_i b}{a} \right]^{0.5}$$

Donde a y b son parámetros que pueden ser determinados a partir de mediciones de precipitación, evapotranspiración y humedad del suelo en la cuenca. Esta función asegura que $Y_i \leq W_i$, $Y_i(0) = 1$ y $Y_i(\infty) = 0$. El límite superior de Y_i es representado por el parámetro b . Thomas Jr, (1981) hace notar que, a excepción de estas propiedades, la función Y_i no tiene algún significado particular. Entonces, al sustituir en las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$W_i - Y_i = Rg_i + Ro_i$$

Para diferenciar la escorrentía de la recarga se asume un coeficiente de reparto c :

$$Ro_i = (1 - c)(W_i - Y_i)$$

$$Rg_i = c(W_i - Y_i)$$

El caudal subterráneo (Qg_i), es decir, aquella fracción del caudal observado en el río que proviene del almacenamiento en la zona saturada (Sg_i), es:

$$Qg_i = d * Sg_i$$

El almacenamiento Sg_i tiene que interpretarse como un almacenamiento dinámico, expresión de la conectividad entre el río y el acuífero. Por lo tanto, al aplicar la ecuación de continuidad a un volumen de acuífero de almacenamiento Sg_i tenemos:

$$Rg_i - Qg_i = \Delta Sg_i = Sg_i - Sg_{i-1}$$

Donde ΔSg_i es el cambio en almacenamiento de la zona saturada y Sg_{i-1} es el almacenamiento de aguas subterráneas en el período inmediatamente anterior. Al sustituir en las ecuaciones anteriores y resolver por Sg_i , tenemos:

$$Sg_i = \frac{Rg_i + Ro_i}{d + 1}$$

El caudal sin considerar extracciones de agua por usuarios o por interacción río-planicie es:

$$Qs_i = Ro_i + Rg_i$$

De acuerdo con Thomas Jr, 1981, los parámetros a , b , c , y d se pueden interpretar de la siguiente forma:

- a** refleja la tendencia de la escorrentía a ocurrir antes de que el suelo esté completamente saturado. Valores de “a” menores a 1 generan escorrentía cuando $W_i < b$ (Alley, 1984)
- b** es el límite superior a la suma de la evapotranspiración real y la humedad del suelo.
- c** es la fracción del caudal promedio del río que proviene del agua subterránea.
- d** es “el recíproco del tiempo de residencia del agua subterránea”.

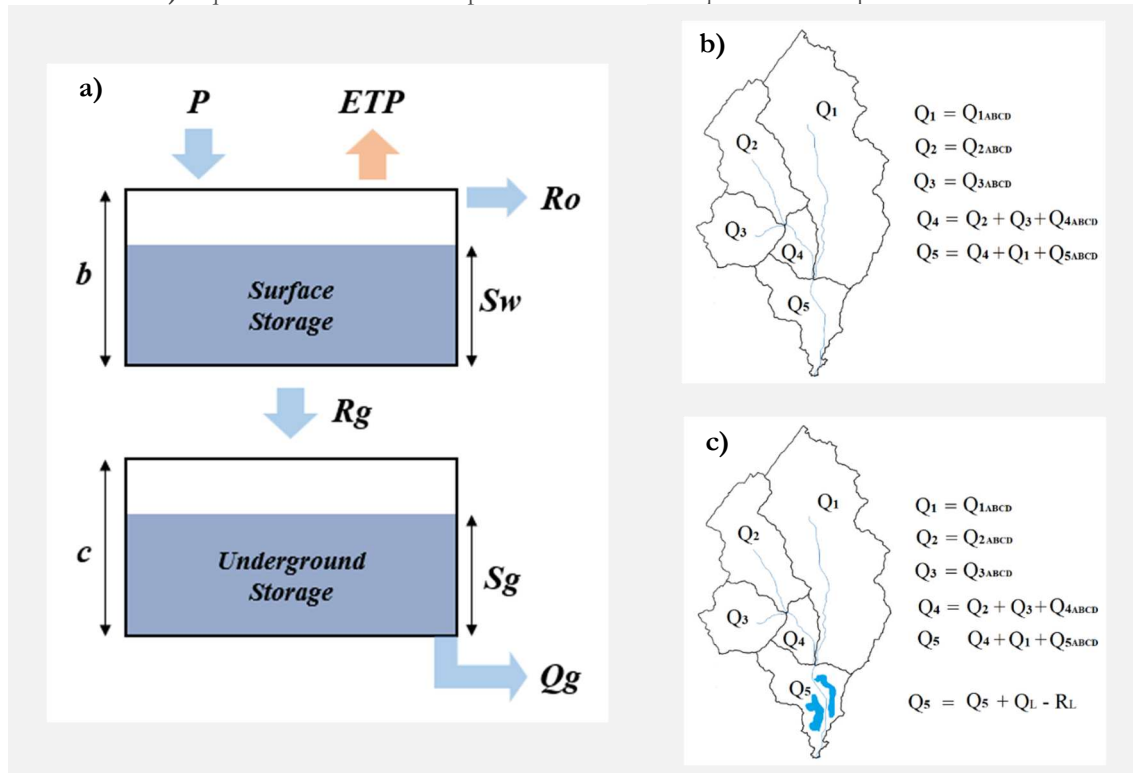
El esquema del modelo de Thomas se puede observar en la **Figura 79a**. En cada paso de tiempo, el modelo realiza el balance hídrico en todas las unidades hidrológicas mediante el modelo de Thomas acumulando los caudales individuales, para obtener como resultado del caudal real simulado a la salida de cada UHA. El diagrama del esquema de cálculo se presenta en la **Figura 79b**. En conjunto con la agregación de los caudales, MoHíTo realiza la extracción de la demanda y la interacción del río con la planicie empleando el modelo conceptual desarrollado por Angarita et al. (2018). Matemáticamente, la

integración del modelo de Angarita, et al. (2018). junto con el modelo de .Thomas Jr. (1981), estaría dada en el caudal acumulado de las cuencas con planicie de inundación:

$$Q_{T_i} = Q_{T_i} - Q_{l_i} + R_{l_i}$$

Donde Q_{T_i} , corresponde al caudal acumulado hasta la UHA_i; el Q_{l_i} representa el flujo lateral entre el río y llanura de inundación, mientras que el R_{l_i} representa los flujos laterales entre el río y la llanura de inundación. En otras palabras, a medida que se está acumulando el caudal, se verifica la existencia de planicie de inundación. De existir, se detiene la acumulación y se realiza el balance mostrado anteriormente. Esquemáticamente la representación sería como lo ilustrado en la **Figura 79c**.

Figura 79. a) Representación esquemática del modelo de Thomas. b) esquema de acumulación de caudales de MoHiTo. c) esquema de interacción río planicie. En azul se esquematizan las planicies de inundación



Conceptualmente, Angarita et al. (2018) plantean que la zona de inundación tendrá un área determinada A_h , que será capaz de almacenar un volumen de agua V_{h_i} . Dicho volumen fluctúa en función de los aportes que le realice el río a la planicie de inundación, o que la planicie a su vez realice al río. Se consideran así mismo, los aportes directos por precipitación (P) y las pérdidas por evapotranspiración (ETR). Si A_T representa el área total acumulada hasta la unidad donde se realiza el balance, se tiene que:

$$V_{h_i} = -Q_{l_i} + R_{l_i} + \frac{A_h}{A_T} * (P_i - ETR_i)$$

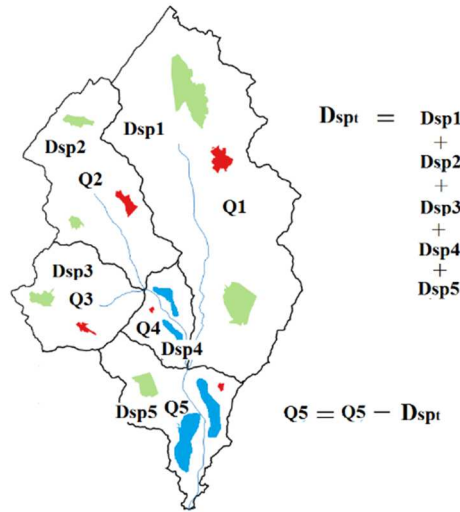
Los flujos bidireccionales son definidos por dos umbrales Q_{UmbraI} y V_{UmbraI} , según la dirección del flujo. De igual forma, es necesario tener en cuenta que no toda el agua que aporte el río a la planicie será almacenada, ni tampoco que toda el agua que aporte la planicie al río se convertirá en caudal. En consecuencia, se definen dos parámetros $T_{río-planicie}$ y $T_{planicie-río}$, los cuales indican el porcentaje de aporte en cada una de las direcciones de la interacción:

$$Q_{li} = \begin{cases} T_{rio-planicie} * (Q_{Ti} - Q_{Umbral}), & \text{si } Q_{Ti} > Q_{Umbral} \\ 0, & \text{si } Q_{Ti} < Q_{Umbral} \end{cases}$$

$$R_{li} = \begin{cases} T_{planicie-rio} * (V_{hi} - V_{Umbral}), & \text{si } V_{hi} > V_{Umbral} \\ 0, & \text{si } V_{hi} < V_{Umbral} \end{cases}$$

Por otra parte, la inclusión de la demanda sigue el mismo concepto utilizado para las planicies de inundación. En cada paso de tiempo se realiza la acumulación de la demanda superficial generada por los sectores hidro dependientes, de tal forma que en cada unidad se tiene la demanda superficial total acumula de todos los sectores (Ver **Figura 80**).

Figura 80. Acumulación de demandas por unidad hidrológica. Los polígonos en verde y rojo representan las zonas de demanda de los diferentes sectores y en azul, se demarcan las planicies de inundación



Al igual que en el modelo de planicies, a medida que se está acumulando el caudal, se realiza también la acumulación de la demanda, paralelamente en cada unidad se verifica si se realiza extracción o no; de existir, se detiene la acumulación y se realiza el siguiente balance:

$$Q_{Ti} = Q_{Ti} - Dsp_i$$

En lo que respecta a la demanda subterránea, el esquema acumulativo que se ha venido describiendo debe ser replanteado, dado que los límites establecidos por las unidades hidrológicas no coinciden necesariamente con las unidades hidrogeológicas (UHG). El modelo de Thomas Jr (1981) realiza los balances a nivel de los acuíferos para cada unidad hidrológica. En concordancia con esto, se podría extraer la demanda subterránea presente en cada unidad del almacenamiento Sg_i . Sin embargo, la implementación de este esquema no prevé que una UHG puede contener varias unidades hidrológicas. En este orden de ideas, MoHiTo realiza una agrupación de las unidades hidrológicas por UHG.

En cada paso de tiempo, MoHiTo realiza la estimación del volumen de agua total Vsb_i^g de las unidades hidrogeológicas “g”, multiplicando los almacenamientos Sg_i^n de las unidades hidrológicas “nu” con sus respectivas áreas. A este volumen se le extrae las demandas subterráneas Dsb_i^n de cada unidad quedando de esta forma afectada el agua subterránea para el paso de tiempo siguiente. El volumen resultante se redistribuye nuevamente en las unidades hidrológicas ponderando por el almacenamiento del paso anterior. Esto con el objetivo de conservar las proporciones en cada una de las unidades hidrológicas. Las expresiones matemáticas que describen este proceso son:

$$Vsb_i^g = \left[\sum_{n=1}^{nu} Sg_i^n * A^n \right] - \left[\sum_{n=1}^{nu} Dsb_i^n \right]$$

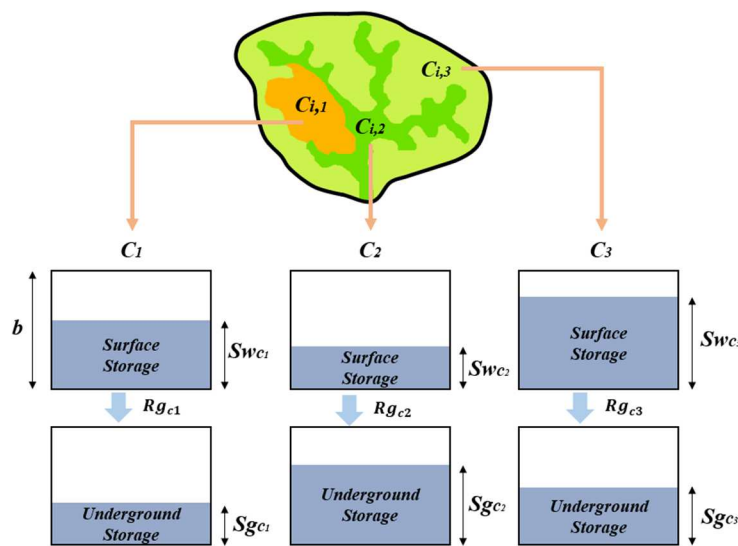
$$Sg_i^n = \frac{Vsb_i^g}{A^n} \frac{Sg_i^n}{\left[\sum_{n=1}^{nu} Sg_i^n \right]}$$

Por último, el esquema de acumulación descrito anteriormente permite incluir retornos superficiales, como una adición al caudal acumulado hasta cada unidad. Por otro lado, MoHiTo considera el cambio del tipo de cobertura con el ánimo de calcular las demandas del sector agrícola. Esto, se hace asociando el coeficiente de cultivo kc al área de cada cobertura (ver **Figura 81**). Para ello, se considera que:

$$Si \begin{cases} \text{Cultivo:} & ET_{i,j} = Kc_j * ETP_i; & Sw_{i-1,j} = Y_i - ET_i \\ \text{Otros:} & ET_i = Y_i * \left(1 - e^{-\frac{ETP_i}{b}} \right) & Sw_{i,j} = Y_i * e^{-\frac{ETP_i}{b}} \end{cases}$$

En general, se obtiene la evapotranspiración, a través de la modificación de la ETP a través del coeficiente de cultivo.

Figura 81. Consideración del tipo de cobertura dentro del esquema de MoHiTo.



9.1.4 Construcción del modelo hidrológico

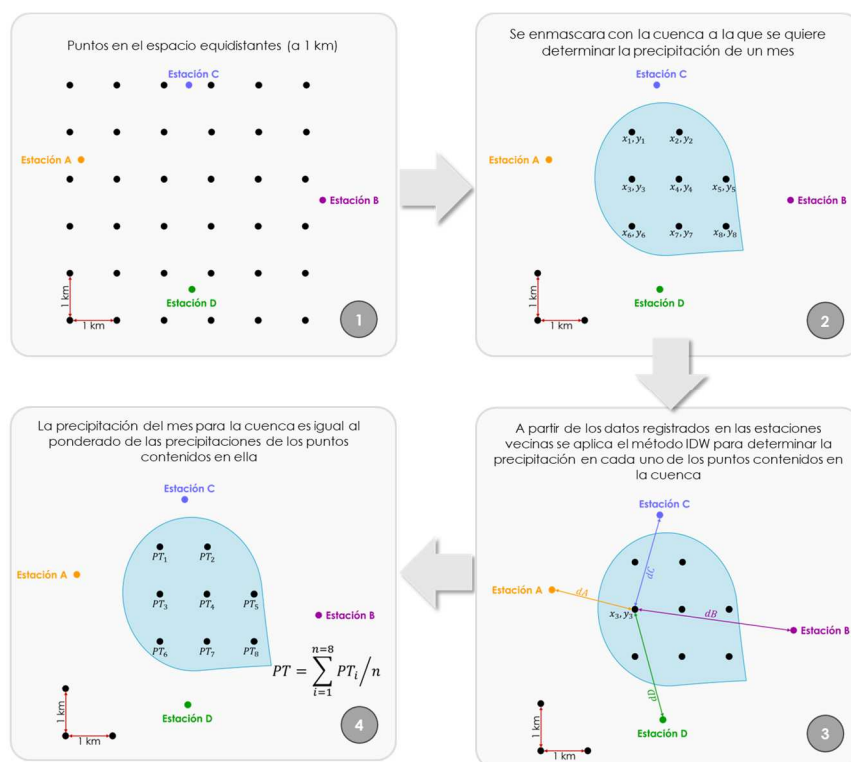
El esquema de cálculo hidrológico considerado fue de tipo semidistribuido y de carácter acumulativo. Esto implica que se generan caudales en cada una de las unidades objeto de modelación (UHA) y luego se agregan aguas abajo hasta su respectivo punto de cierre. Así pues, tomando en cuenta que se contó con los registros de las estaciones, se optó por construir un modelo hidrológico acoplando todas las áreas de drenaje aferentes a estas estaciones.

9.1.4.1 Series de precipitación y evapotranspiración

A cada una de las unidades de modelación, se les generó las series de precipitación y evapotranspiración potencial haciendo uso de metodologías de interpolación. Para el caso de la precipitación, se usó el método de interpolación de distancia inversa ponderada o IDW. Metodológicamente, se generó una grilla con una separación de 1 km y se asignó un valor de precipitación en cada uno de los puntos, luego se

generó una estadística zonal de promedio, obteniendo así el valor de precipitación de la unidad (ver **Figura 82**).

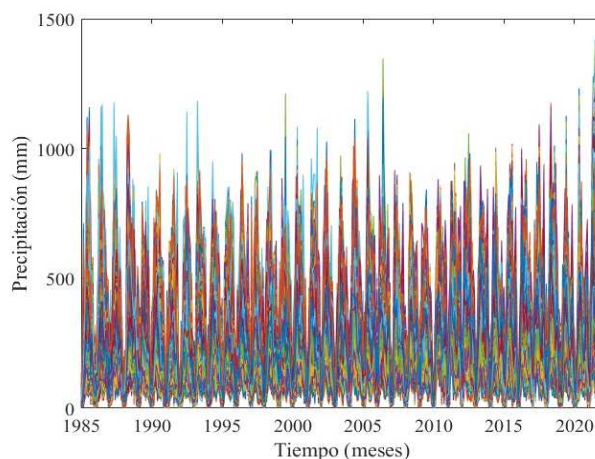
Figura 82. Esquematización de asignación de series de precipitación para las unidades de modelación en la VRO



Fuente: Tarulla S.A.S (2023)

Este proceso se realizó para cada mes en el periodo de tiempo considerado para la calibración y validación del modelo. En la **Figura 83**, se presentan de manera representativa las series de tiempo de precipitación de todas las unidades.

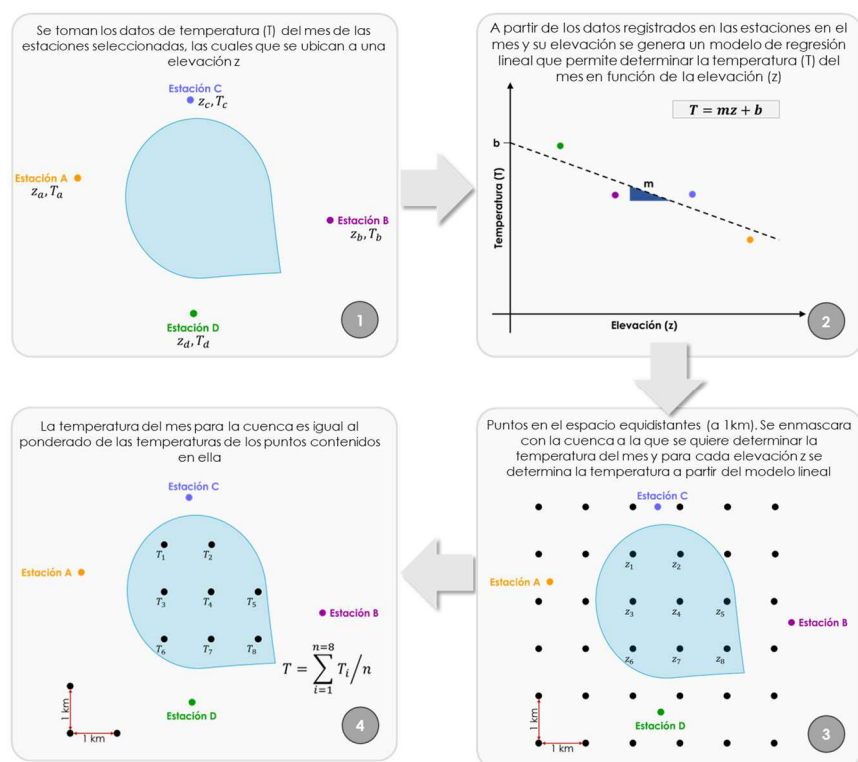
Figura 83. Series de precipitación para las unidades de modelación



En lo que respecta a la evapotranspiración potencial, esta se derivó a partir de datos de temperatura haciendo uso del método de Thornwhite, basado en la temperatura media mensual del aire. Para más detalles ver Wilm et al., (1944). Metodológicamente, con ayuda de modelo de elevación digital de terreno

se generó un modelo de regresión lineal en función de las elevaciones para poder determinar la temperatura a la altura del centroide de cada unidad de modelación. Este proceso se realizó para cada mes en el periodo de tiempo considerado para calibración y validación del modelo (ver **Figura 84**).

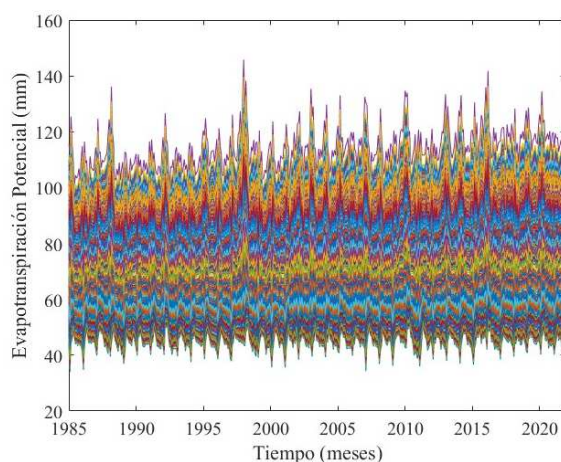
Figura 84. Esquematización de asignación de series de temperatura para las unidades de modelación en la VRO



Fuente: Tarulla S.A.S (2023)

Obtenida la temperatura en cada una de las unidades, se aplicó la ecuación de Thornwaite y se obtuvo la evapotranspiración potencial. En la **Figura 85** se presentan las series de evapotranspiración potencial obtenidas para cada unidad de modelación.

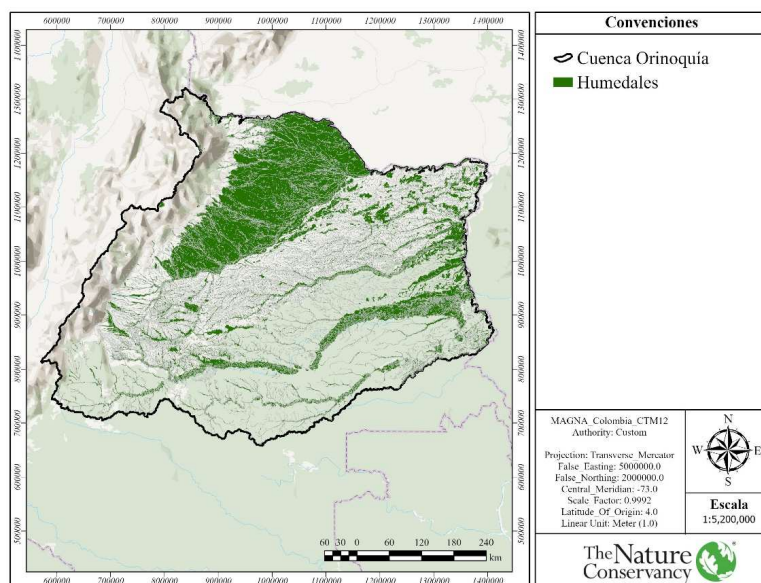
Figura 85. Series de evapotranspiración potencial para las unidades de modelación



9.1.4.2 Áreas de humedales

Como se mencionó anteriormente, Angarita et al. (2018) incluye zonas de inundación como un área determinada capaz de almacenar un volumen de agua en función de la interacción entre río y la planicie de inundación. Dichas áreas de almacenamiento se basan en la información cartográfica asociada a los humedales presentes en la zona. Esta información, se obtuvo de la capa de humedales del año 2020 a escala 1:100.000 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS. La **Figura 86** muestra el área de humedales presentes en la VRO.

Figura 86. Área de humedales presentes en la VRO



9.1.4.3 Componente de demandas del modelo hidrológico

Para el desarrollo del modelo, las demandas de caudal se basan en los requerimientos de 5 sectores hidro dependientes a saber: Agricultura, Pecuario Población, Hidrocarburos y Minería. Para cada uno de ellos se consideran diferentes módulos de consumo, los caudales permiten realizar las extracciones de caudal correspondientes sobre la red de drenaje. Como se mencionó anteriormente, en cada intervalo de tiempo, se lleva a cabo la suma de la demanda superficial generada por los sectores mencionados registrando para cada unidad, la demanda total acumulada. A continuación, se describe la obtención de la información, así como los valores de demanda para cada sector mencionado.

9.1.4.3.1 Agricultura

El uso del agua en la producción agrícola fue establecido en función de las necesidades de riego de los diferentes cultivos, mediante la evaluación de la cantidad de agua y el momento de su aplicación. Con este enfoque, se logró un equilibrio entre la cantidad de agua requerida por el cultivo, en compensación por las pérdidas por evapotranspiración, y la precipitación efectiva. En este sentido, la demanda de agua para el sector agrícola se considera como el agua extraída para satisfacer los requisitos hídricos de los cultivos mediante el riego. La información para la estimación fue obtenida a través de la base de datos CORINE Land Cover (CLC) para Colombia (IDEAM, 2010a). Las áreas de cultivo se distribuyen de forma proporcional para cada UHA, a través de la cantidad de área aferente de cultivo asociado a dicha unidad de análisis. La **Tabla 31**, muestra los tipos de cultivo analizados, su correspondiente código CLC y los coeficientes de cultivo (Kc) adoptados para cada uno de ellos. IDEAM (2010b)

Tabla 31. Coeficientes de cultivo (Kc) considerados para cada tipo de cultivo.

Código CLC	Cobertura	Kc	Fuente
11	Zonas Urbanizadas	0	-
12	Zonas Industriales	0	-
13	Zonas de extracción minera	0	-
14	Zonas verdes artificiales, no agrícolas	0	-
211	Otros cultivos transitorios	0.83	(IDEAM, 2010c)
212	Cereales	0.7	(IDEAM, 2010c)
221	Cultivos permanentes herbáceos	0.77	(IDEAM, 2010c)
222	Cultivos permanentes arbustivos	1.05	(IDEAM, 2010c)
223	Cultivos permanentes arbóreos	0.81	(IDEAM, 2010c)
224	Cultivos agroforestales	0.89	(IDEAM, 2010c)
2121	Arroz	1.15	(IDEAM, 2010c)
2122	Maíz	0.63	(IDEAM, 2010c)
2123	Sorgo	0.6	(IDEAM, 2010c)
2134	Soya	0.63	(IDEAM, 2010c)
2141	Cebolla	0.97	(IDEAM, 2010c)
2151	Papa	0.78	(IDEAM, 2010c)
2211	Otros cultivos permanentes herbáceos	0.76	(IDEAM, 2010c)
2212	Caña	0.8	(IDEAM, 2010c)
2223	Cacao	1.03	(IDEAM, 2010c)
2231	Otros cultivos permanentes arbóreos	0.76	(IDEAM, 2010c)
2232	Palma de aceite	0.98	(IDEAM, 2010c)
2241	Pastos y árboles plantados	0.89	(IDEAM, 2010c)
2242	Cultivos y árboles plantados	0.81	(IDEAM, 2010c)
23	Pastos	0.89	(IDEAM, 2010c)
24	Áreas agrícolas heterogéneas	0.89	(IDEAM, 2010c)
31	Bosques	0.86	(Monteiro et al., 2016)
32	Áreas con vegetación herbácea/arbustiva	0.76	(IDEAM, 2010c)
33	Áreas abiertas sin o con poca vegetación	0	-
41	Áreas húmedas continentales	0	-
51	Áreas continentales	0	-

A manera de ejemplo, la **Figura 87** y **Figura 88** muestra la distribución espacial de los cultivos palma de aceite y arroz respectivamente, determinados para la VRO. Como se mencionó anteriormente, el área de cada uno de los 21 cultivos analizados se asigna para la UHA sobre la cual se encuentra, usando las coberturas CLC del año 2018 (IDEAM, 2010c).



Figura 87. Distribución espacial de cultivos de palma de aceite en la VRO

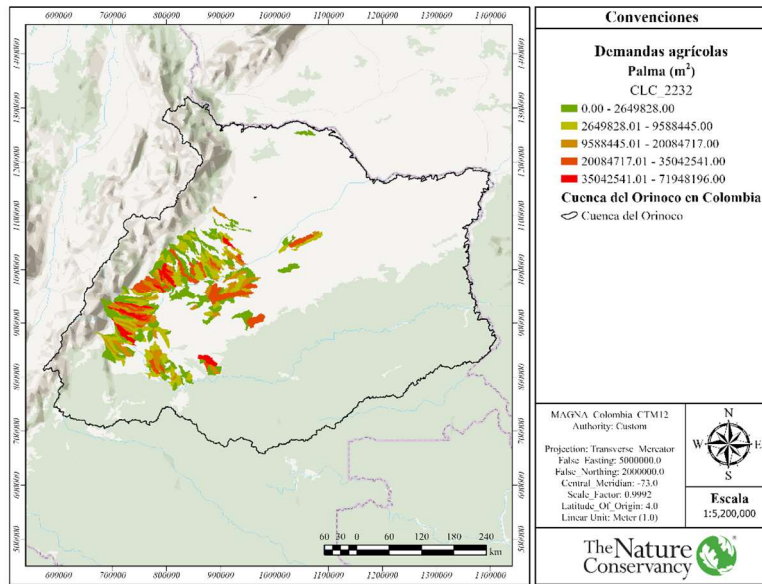
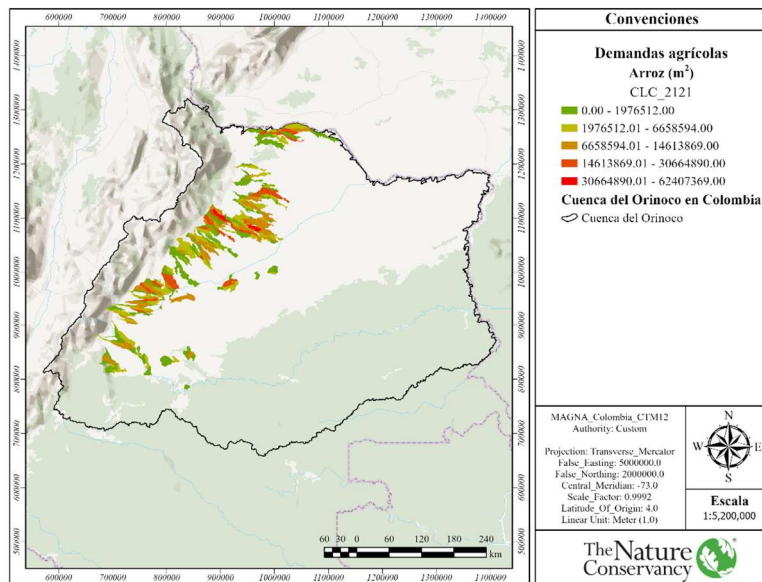


Figura 88. Distribución espacial de arroz de aceite en la VRO



De la misma forma, las demandas hídricas para cada cultivo se determinan a través del siguiente proceso:

1. Se realiza un balance hídrico $B_{i,j}$ entre la evapotranspiración y la precipitación usando el área del cultivo $A_{i,j}$ sobre la UHA:

$$B_{i,j} = A_{i,j}(ETP_i - P_i)$$

2. El valor de la demanda $D_{i,j}$, del cultivo j asociado a la i -ésima UHA, se determina como:

$$D_{i,j} = \frac{A_{i,j} B_{i,j}}{1 - Loss_j}$$

Siendo $Loss_j$, el porcentaje de pérdidas (agua que no puede ser extraída) asociadas al cultivo j .

A manera de ejemplo, la **Figura 89** y **Figura 90** muestra los valores de demanda hídrica obtenidos para los cultivos de palma de aceite y arroz aplicando la ecuación anterior.

Figura 89. Distribución de la demanda hídrica (m^3) para cultivos de palma de aceite sobre la VRO

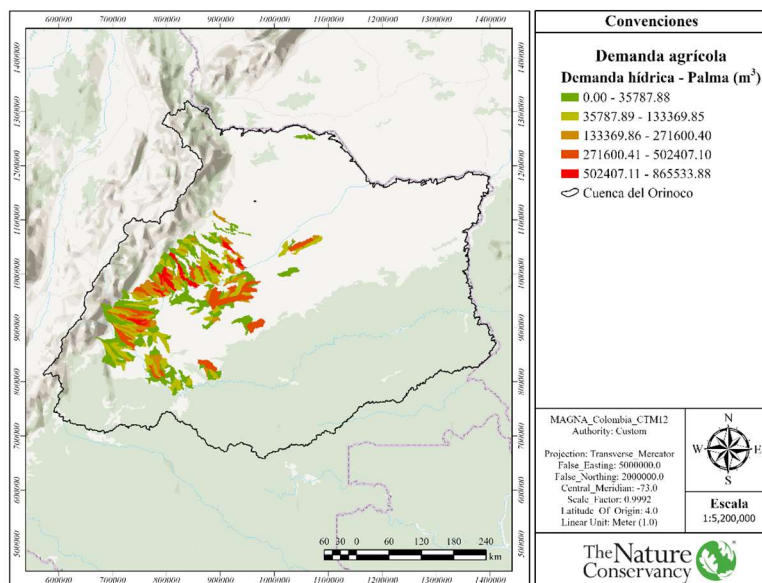
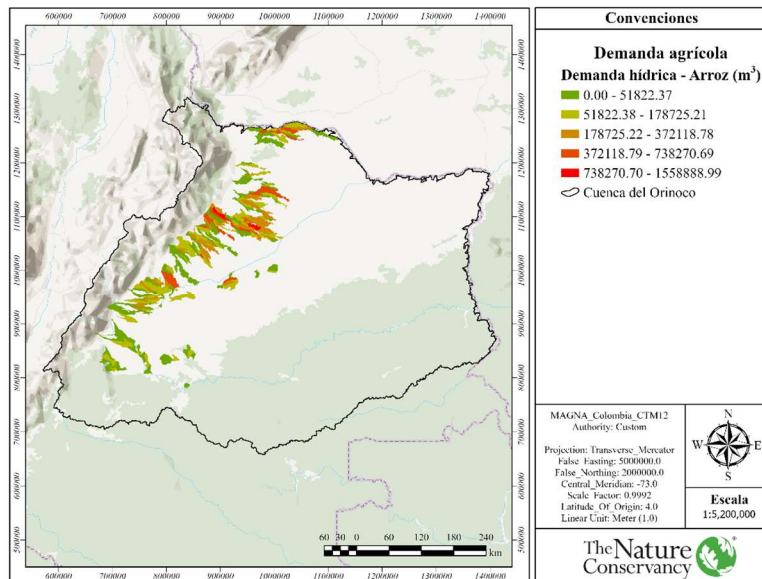


Figura 90. Distribución de la demanda hídrica (m^3) para cultivos de arroz sobre la VRO



9.1.4.3.2 Doméstico

Para el sector doméstico, se consideraron las proyecciones de población del Departamento Nacional de Estadísticas -DANE- desde el año 1985 hasta 2035 para cada uno de los municipios dentro de la VRO, distribuyendo de forma proporcional entre la zona rural y zona urbana, usando como punto base, las ubicaciones de los centros poblados por municipio. La demanda hídrica para el sector doméstico Dd se estimó como:

$$Dd_i = \frac{M_i V_i N_m}{1 - Loss_i}$$

Donde M_i y V_i hacen referencia al módulo de consumo por habitante, estipulado en 130 l/hab-día, a partir de del Estudio Nacional del Agua 2010 - ENA 2010 (IDEAM, 2010c), y V_i está asociada al número de habitantes de la i -ésima UHA. Así mismo, N_m alude a la cantidad de días del mes sobre el cual se calcula la demanda. La **Figura 91** muestra la distribución espacial por UHA, asignada para la VRO. De la misma forma la **Figura 92** muestra la demanda hídrica en m³.

Figura 91. Distribución espacial de la población por UHA en la VRO

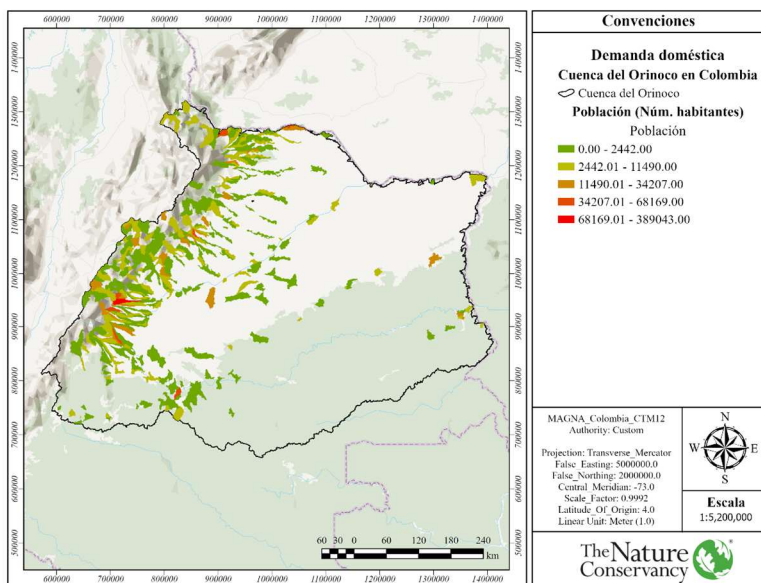
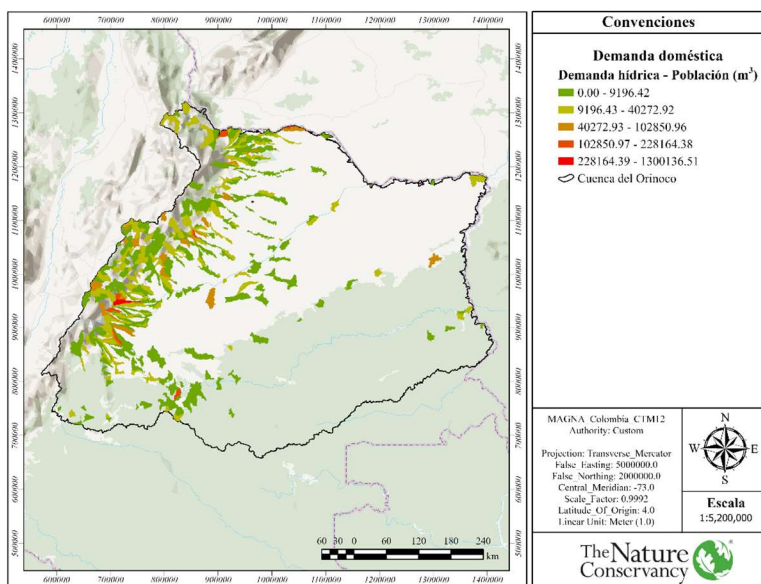


Figura 92. Distribución espacial de la demanda hídrica (m³) para el sector doméstico en la VRO



9.1.4.3.3 Pecuario

Para el sector pecuario, se obtuvieron los datos de los censos agropecuarios por parte del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) relacionados con bovinos, porcinos y aves. La distribución espacial de los mismos se hace a partir de las coberturas relacionadas con territorios agrícolas (código 2 de la codificación CORINE Land Cover), asignando la cantidad de animales de los censos agropecuarios a cada una de las UHA correspondientes. A manera de ejemplo en las **Figura 93**, **Figura 94** y **Figura 95**, la distribución espacial para la cantidad de aves de engorde, bovinos (< 1 mes) y porcinos respectivamente.

Figura 93. Distribución de aves de engorde por UHA en la VRO

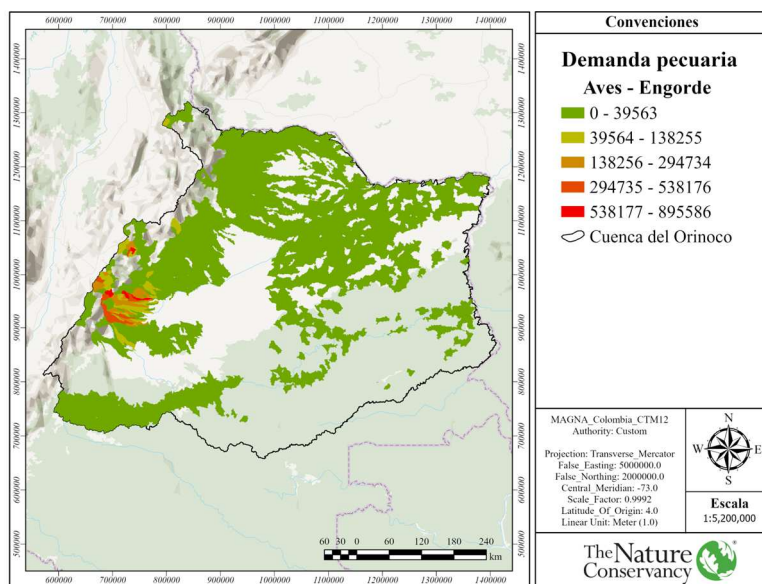


Figura 94. Distribución de bovinos (<1mes) por UHA en la VRO

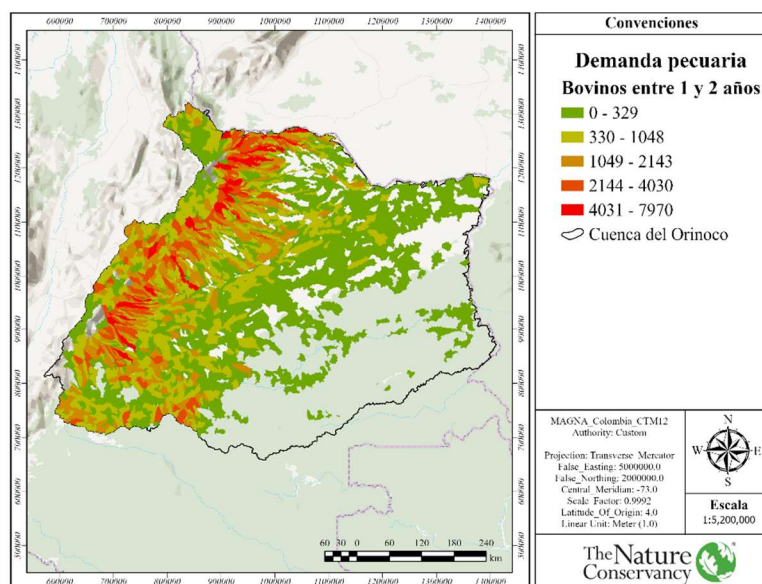
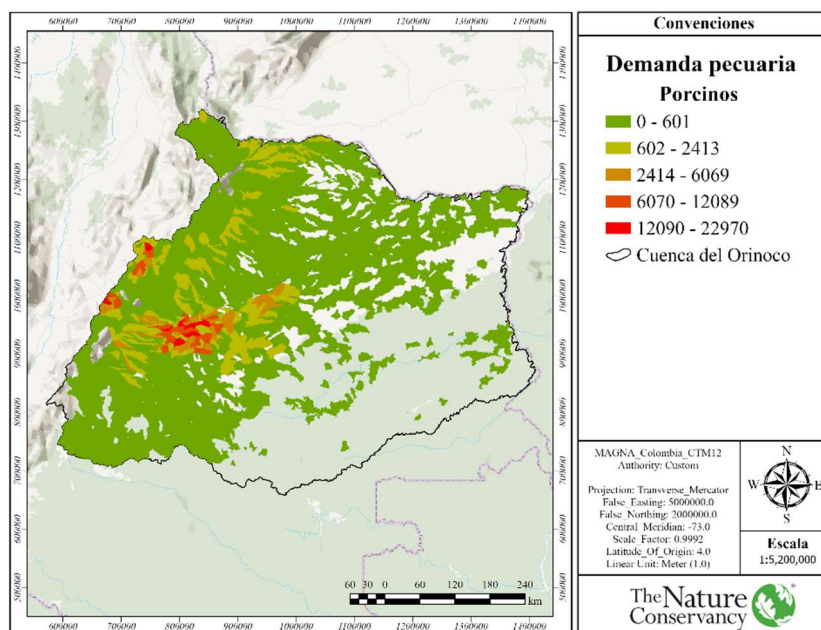


Figura 95. Distribución de porcinos por UHA en la VRO



En la **Tabla 32** se muestra los módulos de consumo para cada tipo de animal, obtenidos a partir del ENA 2010.

Tabla 32. Módulos de consumo por tipo de animal.

Tipo de animal		Módulo de consume (l/animal*día)
Bovinos	1 mes	25
	12-24 meses	45
	24-36 meses	95
	>36 meses	100
Porcinos	Total	13.5
Aves	Engorde	0.35
	Genético	0.25
	Levante	0.25
	Postura	0.25

Fuente: IDEAM (2010)

Así mismo, el cálculo de la demanda para el sector pecuario Dp_i se determina como:

$$Dp_i = \frac{M_{i,j} V_{i,j} N_m}{1 - Loss_{i,j}}$$

Donde $M_{i,j}$ y $V_{i,j}$ hacen referencia al módulo de consumo por animal (ver **Tabla 32**). Así mismo, $V_{i,j}$ está asociada a la cantidad de animales de la clase j (j =bovinos (1), aves (2), porcinos (3)), dentro de la i -ésima UHA. De la misma forma, N_m alude a la cantidad de días del mes correspondiente sobre el cual se calcula la demanda. A manera de ejemplo en las **Figura 93**, **Figura 94** y **Figura 95**, la distribución espacial de la demanda para aves de engorde, bovinos (< 1 mes) y porcinos respectivamente.

Figura 96. Distribución espacial de la demanda hídrica (m3) para aves de engorde por UHA en la VRO

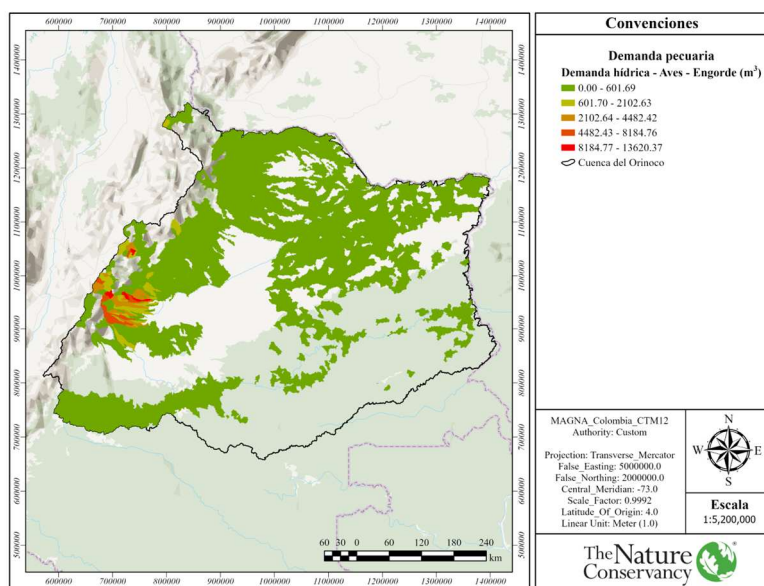


Figura 97. Distribución espacial de la demanda hídrica (m3) para bovinos (<1mes) por UHA en la VRO

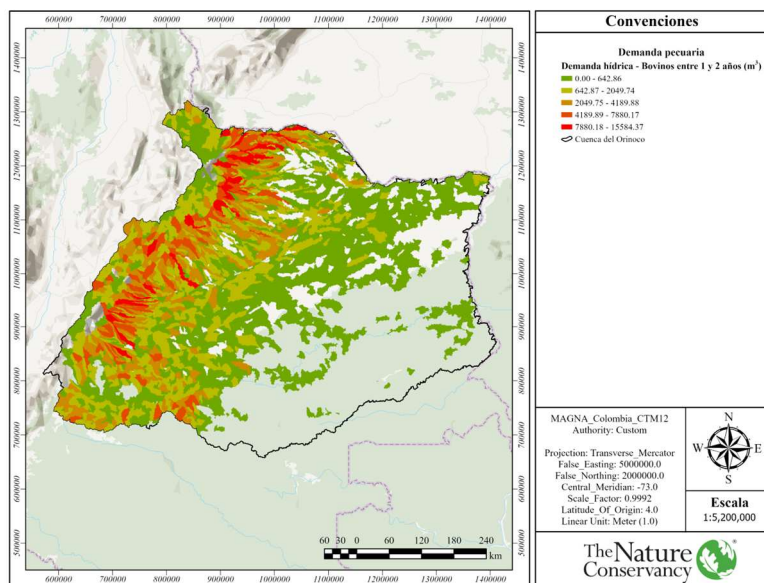
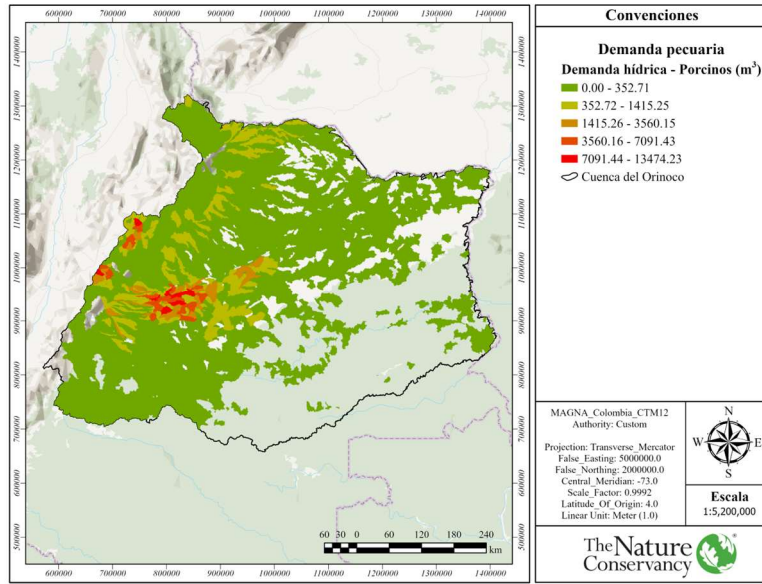


Figura 98. Distribución espacial de la demanda hídrica (m³) para porcinos por UHA en la VRO



9.1.4.3.4 Hidrocarburos

Para el caso de hidrocarburos, se obtuvieron los datos de producción fiscalizada de petróleo por campo para el año 2022, provenientes de la Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH-. La distribución espacial de este sector se dio a través de la localización de los pozos petroleros por UHA. La demanda hídrica del sector hidrocarburos se estimó como:

$$Dh_i = \frac{M_i V_i}{1 - Loss_i}$$

Donde M_i y V_i hacen referencia al módulo de consumo para el sector de hidrocarburos, estipulado en 358.34 l/barril-día y descrito dentro del ENA 2010(IDEAM, 2010d). Así mismo, $V_{i,j}$ está asociada a la cantidad de barriles producidos dentro de la i -ésima UHA. La **Figura 99** muestra la distribución espacial de la producción de barriles de petróleo por UHA. De la misma forma, la **Figura 100** muestra la demanda hídrica estipulada para el sector de hidrocarburos.

Figura 99. Producción de barriles por UHA por día en la VRO

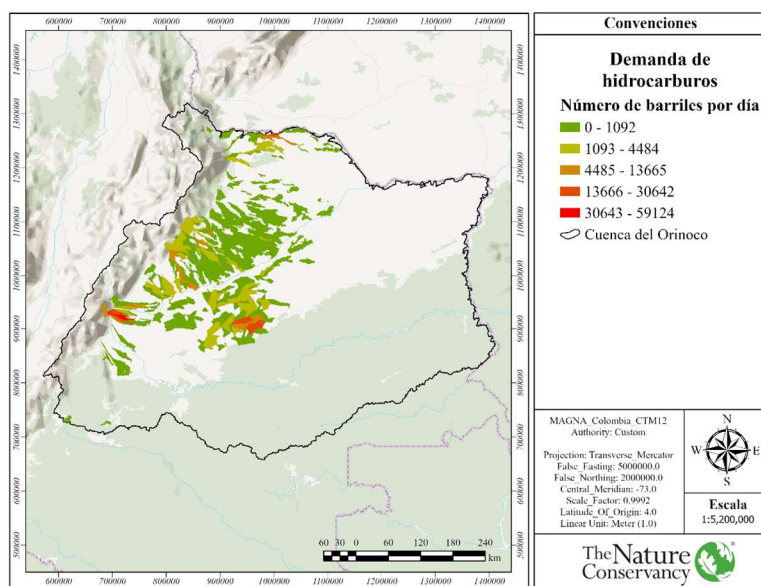
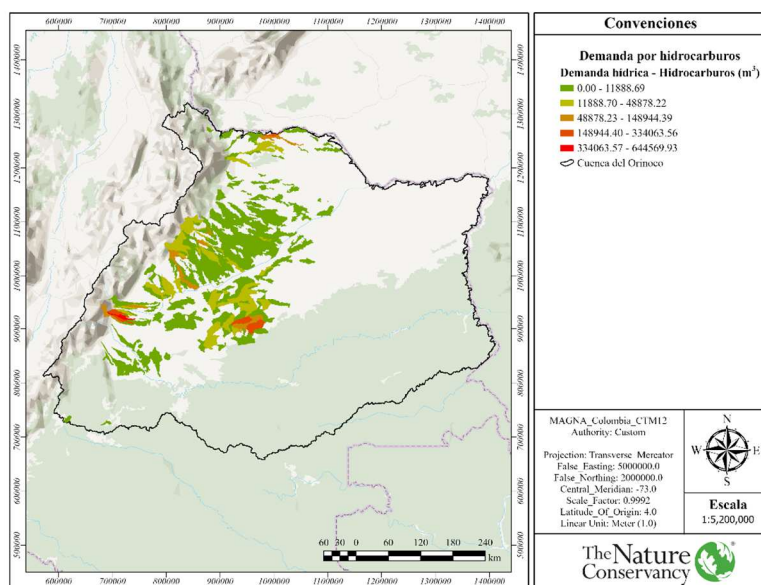


Figura 100. Demanda hídrica para el sector hidrocarburos en la VRO



9.1.4.3.5 Minería

Para determinar la demanda del sector minero, se obtuvieron los datos de producción de la Agencia Nacional de Minería (ANM), en donde se muestran los datos discretizados por municipio, mineral y año. El módulo de consumo para cada mineral se obtuvo de datos del ENA 2010 (IDEAM, 2010d), los cuales se pueden encontrar en la **Tabla 33**. En cuanto a la distribución espacial, se obtuvieron las áreas por UHA a través de las coberturas de zonas mineras provenientes de las coberturas CLC del año 2018.

$$Dm_i = \frac{M_i V_i}{1 - Loss_i}$$

Aquí, M_i y V_i hacen referencia al módulo de consumo para el sector minero. Así mismo, $V_{i,j}$ está asociada a las toneladas producidas de ese mineral dentro de la i -ésima UHA. A manera de ejemplo, la **Figura 101** y la **Figura 102** muestran respectivamente, la distribución espacial de la arcilla por cada UHA junto con la demanda hídrica requerida.

Tabla 33. Módulos de consumo por tipo de mineral

Mineral	Módulo de consumo (l/t-día)
Arcilla miscelánea	0.37
Arena de río	0.12
Arena silícea	0.02
Carbon	1.3
Grava de río	0.12
Hierro	0.03
Yeso	0.01

Fuente: IDEAM (2010).

Figura 101. Distribución espacial de producción de arcilla en la VRO.

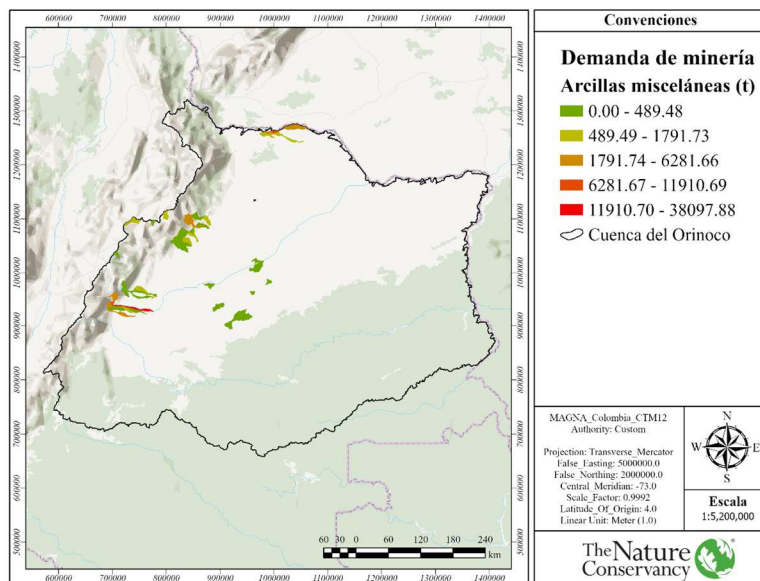
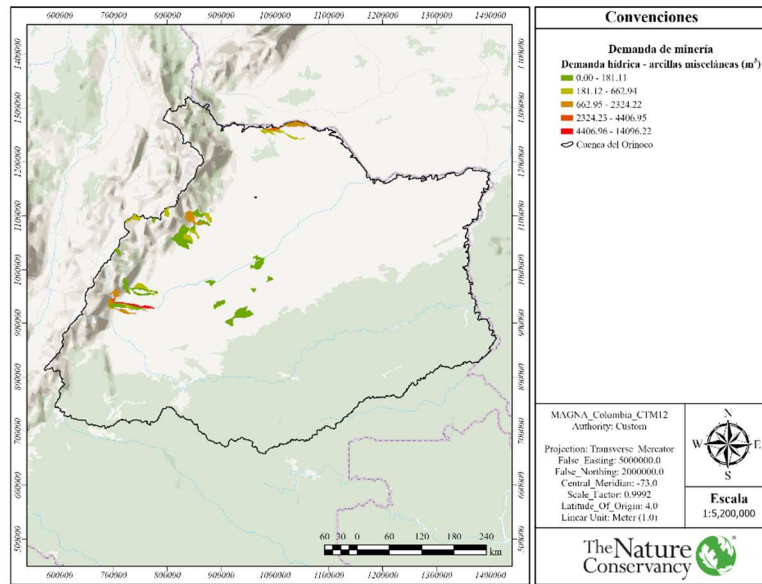


Figura 102. Demanda hídrica asociada a la producción de arcilla en la VRO.



9.1.5 Esquema de calibración y validación del modelo hidrológico

La calibración y validación del modelo hidrológico se realizó mediante un algoritmo de optimización matemática heurístico. Una heurística se define como una técnica que aumenta la eficiencia de un proceso de búsqueda, siendo esta una correspondencia entre las descripciones de estados del problema hacia alguna medida de deseabilidad, normalmente representada por una métrica de desempeño. Éstas a su vez, resultan adecuadas en el sentido de que generalmente guían el proceso de búsqueda en la dirección más provechosa sugiriendo qué camino tomar cuando hay más de uno disponible.

En concordancia con lo anterior, se utilizó la técnica de muestreo aleatorio *Latin Hypercube Sampling* (LHS) propuesta por primera vez por McKay et al. (1979) y es quizás el método de muestreo aleatorio más utilizado para la cuantificación de la incertidumbre y el análisis de confiabilidad basado en Simulaciones de Monte Carlo (S Giri et al., 2019). A continuación, se realiza la explicación del algoritmo:

Sea N el número requerido de realizaciones y K el número de variables aleatorias. El espacio de muestreo es entonces K -dimensional. Se establece una matriz $\mathbf{P} = N \times K$, en la que cada una de las K columnas es una permutación aleatoria de $1, \dots, N$, y una matriz $\mathbf{R} = N \times K$ de números aleatorios independientes de la distribución uniforme $(0,1)$. Estas matrices forman el plan de muestreo básico, representado por la matriz $\mathbf{S}$ como:

$$\mathbf{S} = \mathbf{I} \mathbf{N} \mathbf{P} - \mathbf{R}$$

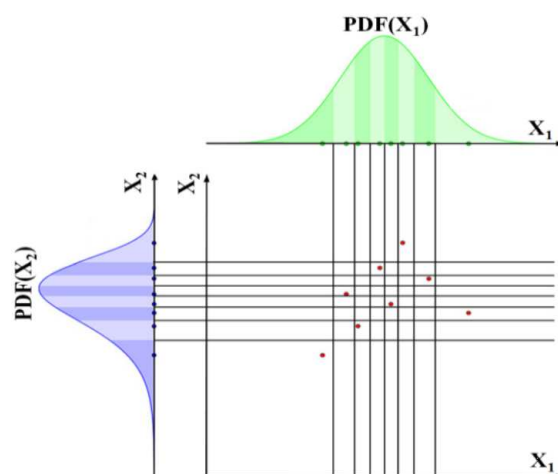
Cada elemento de $\mathbf{S}$, s_{ij} , se mapea de acuerdo con su distribución marginal objetivo como

$$\hat{X}_{ij} = F_{X_j}^{-1}(s_{ij})$$

Donde $F_{X_j}^{-1}$ representa la inversa de la función de distribución acumulativa objetivo para la variable j . Un vector $\mathbf{X}_i = X_{i1} X_{i2} \dots X_{ik}$ ahora contiene datos de entrada para un cálculo determinista.

En la figura se presenta el esquema del LHS para el caso con dos variables y ocho muestras. Nótese que, la muestra se distribuye por todo el espacio de muestreo, ya que la generación del LHS requiere una imagen de cada fila y cada columna.

Figura 103. Distribución espacial de cuencas para calibración



Fuente: Giri et al. (2019)

Se utilizaron 48 estaciones de caudal para realizar el proceso de calibración y validación del modelo hidrológico MoHiTo en la VRO. En la **Tabla 4**, se presentan los periodos considerados para calibración y validación en cada una de las estaciones seleccionadas.

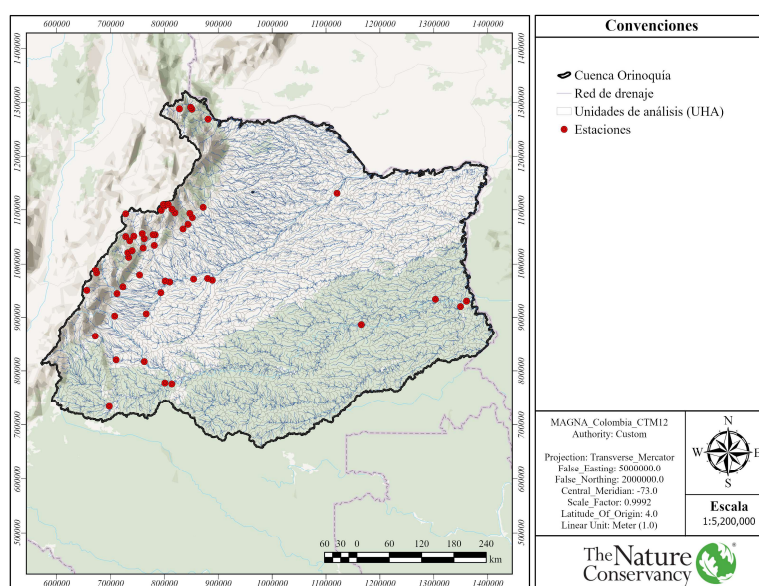
Tabla 34. Estaciones de calibración y periodos considerados para calibración y validación de los modelos hidrológicos

No	Código	Nombre	Calibración		Validación	
			Inicio	Fin	Inicio	Fin
1	32037030	La macarena	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
2	32037010	La balsora	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
3	32107010	Pto Arturo	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
4	32047010	Raudal dos	abr-85	dic-10	ene-11	dic-21
5	32157010	Mapiripana	jul-85	dic-10	ene-11	dic-21
6	32087040	Candilejas	abr-85	sep-96	oct-96	ago-01
7	32077080	Pto rico	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
8	32077070	Pinalito	jun-85	dic-10	ene-11	dic-21
9	32077100	Penas blancas	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
10	32077110	El limon	ene-85	may-09	jun-09	nov-19
11	32157060	Barranco murcielago	jul-85	dic-10	ene-11	dic-21
12	32067030	Pto angosturas	ene-94	may-09	jun-09	dic-15
13	31097020	Pto inirida	ene-85	sep-10	oct-10	oct-21
14	35137010	Cejalito	may-87	ene-05	feb-05	sep-12
15	35017040	El barro	abr-85	dic-10	ene-11	dic-21
16	35127030	La esperanza	ago-85	abr-09	may-09	jul-19
17	35017050	Rincon del pajure	ene-85	oct-89	nov-89	nov-91
18	35027140	Pte carretera guayuriba	ene-85	jul-91	ago-91	may-94
19	35017020	Pte lleras automatica	ene-85	jul-04	ago-04	dic-12
20	35027130	Pte quevedo	ene-87	jun-97	jul-97	dic-01
21	35027200	El palmar	ene-85	nov-97	dic-97	jun-03
22	35107030	Cabuyaro	may-85	dic-10	ene-11	dic-21
23	35107010	Pte cabuyarito	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
24	35127010	Pto gaitan	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
25	35027190	Guacapate	ene-85	mar-05	abr-05	dic-13
26	35117010	Humapo	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
27	35127020	Camp yuca	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
28	35057010	El cable	ene-85	sep-02	oct-02	abr-10
29	35177020	Pto texas	mar-85	mar-04	abr-04	may-12
30	35217020	La estacion	ene-85	sep-05	oct-05	ago-14
31	35067030	Ubala	ene-85	may-09	jun-09	nov-19
32	35067050	Pte holguin	ene-95	may-05	jun-05	nov-09
33	35067010	La gloria	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21

No	Código	Nombre	Calibración		Validación	
			Inicio	Fin	Inicio	Fin
34	35197180	Mani	ene-99	ene-15	feb-15	dic-21
35	35227090	Pte carretera	ene-90	abr-12	may-12	nov-21
36	35097090	La reventonera	ene-85	nov-05	dic-05	nov-14
37	35077120	El caracol	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
38	35087020	Paez	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
39	35087030	Pte forero	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
40	35267030	Sta maria	ene-98	sep-14	oct-14	dic-21
41	35197190	Pajarito automatica	jun-99	mar-15	abr-15	dic-21
42	35217010	Pte yopal	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
43	35217060	El playon	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
44	35267080	Aguaverde	ene-85	nov-10	dic-10	dic-21
45	33077010	Sta rita	ene-90	may-12	jun-12	dic-21
46	36027050	Cravo norte	ene-94	jul-13	ago-13	dic-21
47	37037010	Paso de la canoa	ene-85	oct-10	nov-10	nov-21
48	32067020	Lejanias	mar-85	jul-94	ago-94	jul-98

En la **Figura 104** presenta la ubicación de las estaciones utilizadas para el proceso de calibración

Figura 104. Localización de las estaciones de caudal utilizadas para calibración



Existen tres razones principales para la evaluación del desempeño de los modelos hidrológicos según Kurtz et al. (2017) y reinterpretadas por Dawson et al. (2007):

- Proporcionar un indicador cuantitativo de la habilidad del modelo para reproducir el comportamiento de la cuenca.
- Proporcionar un medio para evaluar mejoras en el modelo o método de modelado.
- Proporcionar un mecanismo para comparar los resultados obtenidos en diferentes estudios de modelización.

El método fundamental para evaluar el rendimiento del modelo en términos de comportamiento funcional es a través de una inspección visual de las diferencias entre los gráficos de series de tiempo simuladas y observadas. Al hacerlo, se puede formular evaluaciones subjetivas del comportamiento del modelo con respecto a la conducta sistemática (e.g. sobreestimación o subestimación) y dinámica (p. Ej. aumento o caída de la señal) del modelo (Dawson et al., 2007).

Por otro lado, para una evaluación objetiva, se debe hacer uso de estadísticos o métricas de desempeño que brinden una visión cuantitativa del rendimiento del modelo (Teegavarapu & Elshorbagy, 2005). Las métricas de desempeño brindan una visión cuantitativa del rendimiento del modelo hidrológico. Actualmente existen una gran cantidad de éstas, lo que impulsa a cuestionarse ¿qué métrica de toda la gran gama existente se debe seleccionar para evaluar el modelo? Por lo general cada métrica es concebida para evaluar que tan bien representa una o más características el modelo con respecto a la realidad. En otras palabras, estas tratan de resolver preguntas como: ¿Qué tan bueno es el modelo para representar los valores mínimos, máximos o medios?, ¿el modelo es capaz de conservar los parámetros estadísticos de la serie observada?, entre muchas otras más.

En este contexto, para llevar a cabo la calibración del modelo se estableció que la métrica a utilizar debe responder de forma adecuada las siguientes preguntas:

- ¿El modelo es capaz de representar el comportamiento promedio de los caudales observados?
- ¿Qué proporción de la varianza estadística de los caudales observado puede ser explicada por el modelo?
- ¿En qué grado el modelo es capaz de representar la dinámica de los caudales observados?

A partir de la revisión de literatura se determinó que la métrica que mejor responde a estas preguntas es el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Ver los trabajos de Teegavarapu and Elshorbagy (2005) y Dawson et al. (2007)). La expresión matemática de esta métrica se presenta a continuación.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_0^t - x_m^t)^2}{\sum_{i=1}^n (x_0^t - x_0^-)^2}$$

Dónde

x_0^t : Valor observado.

x_m^t : Valor simulado.

x_0^- : Valor promedio.

Esta métrica varía desde $-\infty$ hasta 1. Cuando el coeficiente de Nash toma un valor de 1 se considera que la calibración del modelo fue perfecta. Los rangos para evaluar el nivel de ajuste con esta métrica se presentan en la **Tabla 35**.

Tabla 35. Rangos para evaluar el desempeño de los modelos con el Nash-Sutcliffe

Desempeño	Nash
Excelente	$0.8 < Nash < 1.0$
Muy Bueno	$0.6 < Nash < 0.8$
Bueno	$0.4 < Nash < 0.6$
Satisfactorio	$0.2 < Nash < 0.4$
Insuficiente	$Nash < 0.2$

A manera de ejemplo, los resultados de la calibración y la validación del modelo en la estación Aguaverde [35267080] se muestran en la **Figura 105**.

Figura 105. Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de calibración del modelo construido para la estación Aguaverde [35267080].

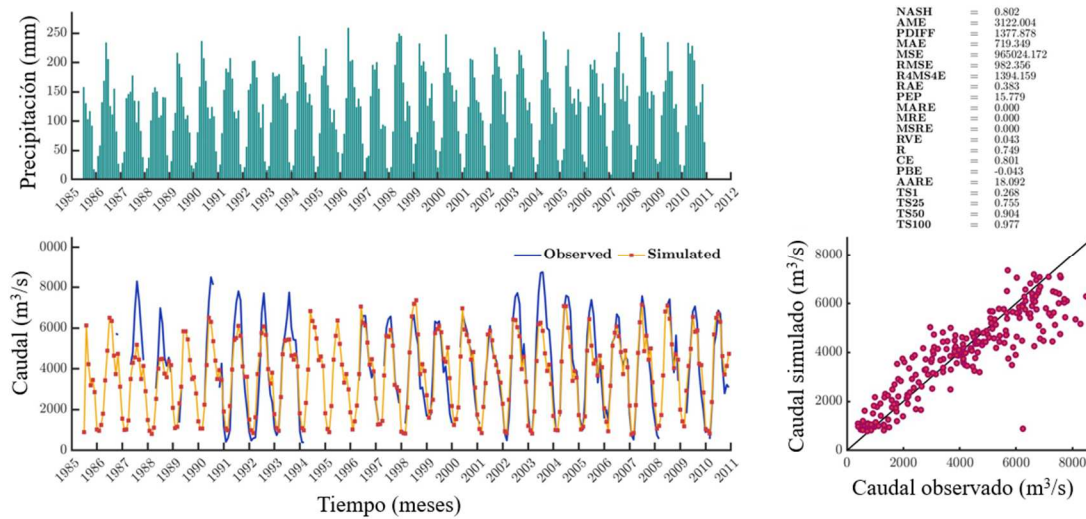
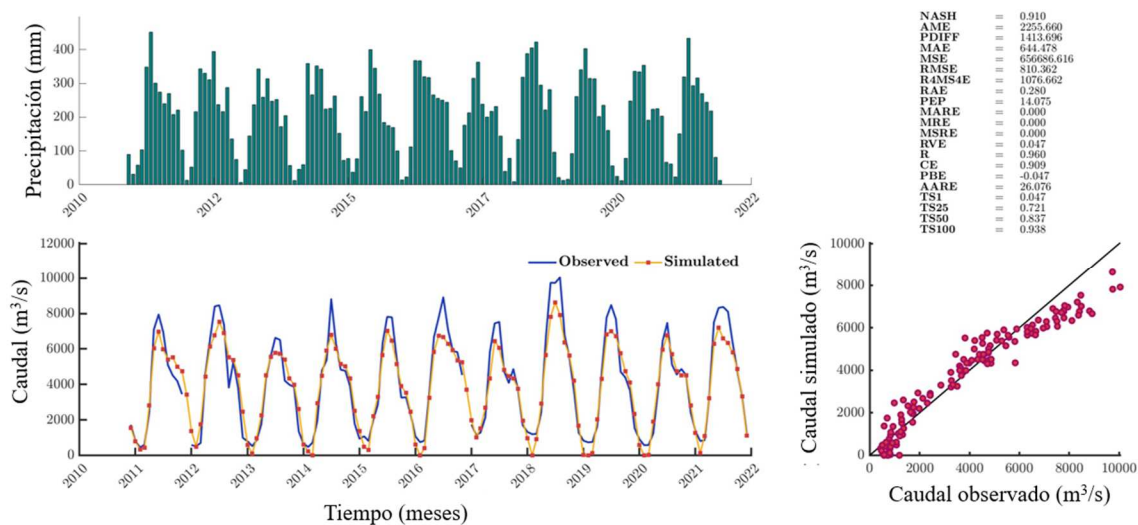


Figura 106. Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de validación del modelo construido para la estación Aguaverde [35267080].



Los parámetros obtenidos del proceso de calibración del modelo construido para las estaciones de interés, así como también los valores de las métricas de desempeño obtenidas, se presentan en la **Tabla 36**.

Tabla 36. Valores de los parámetros calibrados para el modelo construido junto con el valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe.

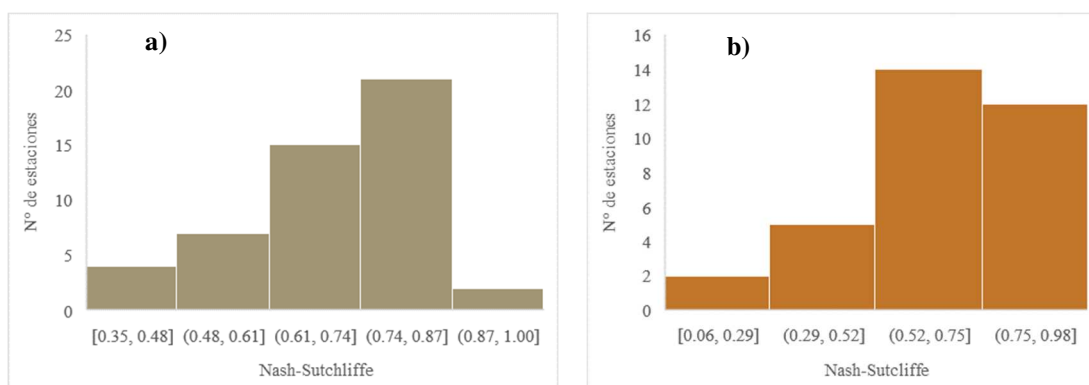
ID	Código	a (Ad)	b (mm)	c (Ad)	d (Ad)	Q_Umb (mm)	V_Umb (mm)	Trp (Porc)	Tpr (Porc)	Sup (Porc)	Nash
2454	35137010	0.92	403.69	0.42	0.01	898.02	16.89	0.76	0.85	0.81	0.670873
2430	35017040	0.39	970.25	0.18	0.01	564.90	10.48	0.46	0.02	0.79	0.822706
2072	35027130	0.37	10.32	0.56	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.554149
1981	35107010	0.94	615.62	0.24	0.05	486.12	158.67	0.05	0.16	0.78	0.68885
1913	35027190	0.75	423.77	0.20	0.03	1469.25	125.99	0.35	0.43	0.80	0.776013
1863	35127020	0.91	990.20	0.15	0.01	208.26	65.60	0.33	0.17	0.70	0.589235
2012	35057010	0.94	279.06	0.16	0.13	1425.69	21.17	0.03	0.88	0.70	0.674489
1509	35067030	0.98	655.01	0.35	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.778229
1452	35067050	0.92	317.91	0.04	0.78	951.74	58.95	0.14	0.30	0.83	0.554069
1472	35067010	0.86	412.25	0.02	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.758621
1326	35227090	0.67	1254.92	0.42	0.01	1464.93	48.31	0.20	0.17	0.89	0.415191
1366	35097090	0.88	477.63	0.07	0.11	1173.60	115.17	0.07	0.87	0.73	0.727379
1242	35077120	0.93	646.74	0.14	0.07	1135.68	70.37	0.12	0.36	0.71	0.671271
1358	35087020	0.76	422.55	0.15	0.25	1239.17	185.28	0.75	0.65	0.99	0.705671
1209	35087030	0.25	31.97	0.34	0.94	1309.50	68.52	0.57	0.74	0.79	0.816814
1033	35197190	0.98	616.40	0.05	0.12	637.29	59.26	0.71	0.91	0.76	0.646082
941	35217010	0.98	303.74	0.22	0.94	1010.15	109.66	0.36	0.68	0.86	0.49048
946	35217060	0.83	645.50	0.10	0.04	284.71	85.70	0.29	0.40	0.78	0.827821
302	36027050	0.88	1963.53	0.20	0.31	1291.87	41.11	0.30	0.06	0.72	0.356429
39	37037010	0.96	544.50	0.01	0.02	1146.09	77.55	0.88	0.53	0.84	0.698492
3740	32037010	0.83	795.94	0.02	0.92	411.15	11.91	0.72	0.52	0.89	0.758566
2829	32077110	0.30	700.26	0.01	0.43	511.95	91.53	0.92	0.14	0.93	0.723368
2433	32067030	0.10	15.99	0.82	0.94	540.57	184.18	0.56	0.71	0.71	0.399059
2292	31097020	0.83	920.66	0.89	0.95	633.71	151.53	0.31	0.03	0.89	0.701373
1375	33077010	0.70	1705.19	0.70	0.80	654.52	64.13	0.64	0.04	0.99	0.537782
2687	32067020	0.47	1095.30	0.29	0.01	243.03	23.92	0.28	0.19	0.81	0.387676
2382	35127030	0.62	1283.44	0.12	0.01	641.39	57.74	0.87	0.35	0.77	0.749292
2293	35017050	0.90	85.22	0.74	0.26	280.55	160.38	0.67	0.32	1.00	0.812972
2041	35027200	0.86	308.08	0.01	0.45	409.39	78.82	0.11	0.73	0.79	0.649812
1528	35197180	0.91	1002.46	0.07	0.05	700.99	120.49	0.10	0.06	0.73	0.552733
4011	32037030	0.89	847.43	0.03	0.40	951.91	19.42	0.24	0.11	0.71	0.805998
2934	32077100	0.51	455.57	0.41	0.01	437.98	73.09	0.11	0.62	0.73	0.632058
1876	35127010	0.97	591.83	0.24	0.18	752.13	197.65	0.89	0.09	0.76	0.810604
1561	35217020	0.74	1050.75	0.12	0.13	1379.44	152.44	0.14	0.14	0.88	0.836171
3609	32047010	0.67	1143.78	0.13	0.01	295.84	28.20	0.71	0.14	0.96	0.782043

ID	Código	a (Ad)	b (mm)	c (Ad)	d (Ad)	Q_Umb (mm)	V_Umb (mm)	Trp (Porc)	Tpr (Porc)	Sup (Porc)	Nash
3320	32077080	0.65	1048.19	0.14	0.07	693.63	48.71	0.92	0.16	0.95	0.728933
3252	32077070	0.87	768.60	0.05	0.88	1088.79	39.67	0.34	0.81	0.78	0.848855
2180	35027140	0.16	398.21	0.01	0.12	529.71	76.67	0.88	0.46	0.70	0.793022
2083	35017020	0.21	1603.03	0.30	0.01	1048.38	154.99	0.27	0.18	0.72	0.832799
3393	32087040	0.94	1118.80	0.03	0.06	1295.46	18.73	0.61	0.68	0.78	0.842881
1949	35107030	0.85	933.47	0.29	0.07	983.79	31.74	0.17	0.72	0.95	0.859192
3595	32107010	0.87	782.54	0.15	0.95	1337.30	114.44	0.81	0.08	0.86	0.847084
3468	32157010	0.90	1260.46	0.33	0.12	133.82	193.15	0.40	0.94	0.83	0.659512
2517	32157060	0.97	1525.96	0.29	0.64	186.34	20.04	0.51	0.90	0.82	0.630292
2252	31097010	0.91	903.21	0.53	0.63	229.10	188.33	0.76	0.91	0.72	0.613161
1801	35117010	0.75	1003.58	0.09	0.17	348.23	11.57	0.04	0.07	0.72	0.917115
1749	35177020	0.98	1058.56	0.21	0.37	314.51	140.43	0.66	0.05	0.83	0.907923
980	35267030	0.80	1732.42	0.22	0.02	433.83	15.27	0.95	0.04	0.84	0.830453
574	35267080	0.86	1158.24	0.21	0.09	513.30	34.01	0.56	0.07	0.74	0.831562

En términos generales, el proceso de calibración del modelo MoHiTo ha demostrado un desempeño que oscila entre satisfactorio y muy bueno, según el criterio de Nash-Sutcliffe (Ver **Tabla 35**). Dado que la mayoría de las estaciones se concentran en la Cordillera de los Andes, existe una alta incertidumbre en la representación de la dinámica espacial de la precipitación en toda la cuenca a escala mensual. A pesar de esto, los resultados resultaron satisfactorios para todas las estaciones durante el proceso de calibración.

En cuanto al rendimiento en la validación, en algunas estaciones este fue insuficiente. Este resultado también se puede atribuir a la falta de datos de registro de caudal en los períodos considerados para la validación. Lo anterior se puede observar en la **Figura 107**, donde se representan los histogramas para el coeficiente de Nash – Sutcliffe para los procesos de calibración (**Figura 107a**) y validación (**Figura 107b**), en función de la cantidad de estaciones de caudal analizadas. Se puede observar que para el proceso de calibración los coeficientes se encuentran en su mayoría entre 0.74 y 0.87. De la misma forma, para el proceso de validación se encuentran valores entre 0.52 y 0.98. lo cual demuestra que el modelo obtiene muy buenos resultados. A pesar de estos desafíos, el modelo se considera adecuado para llevar a cabo los análisis correspondientes.

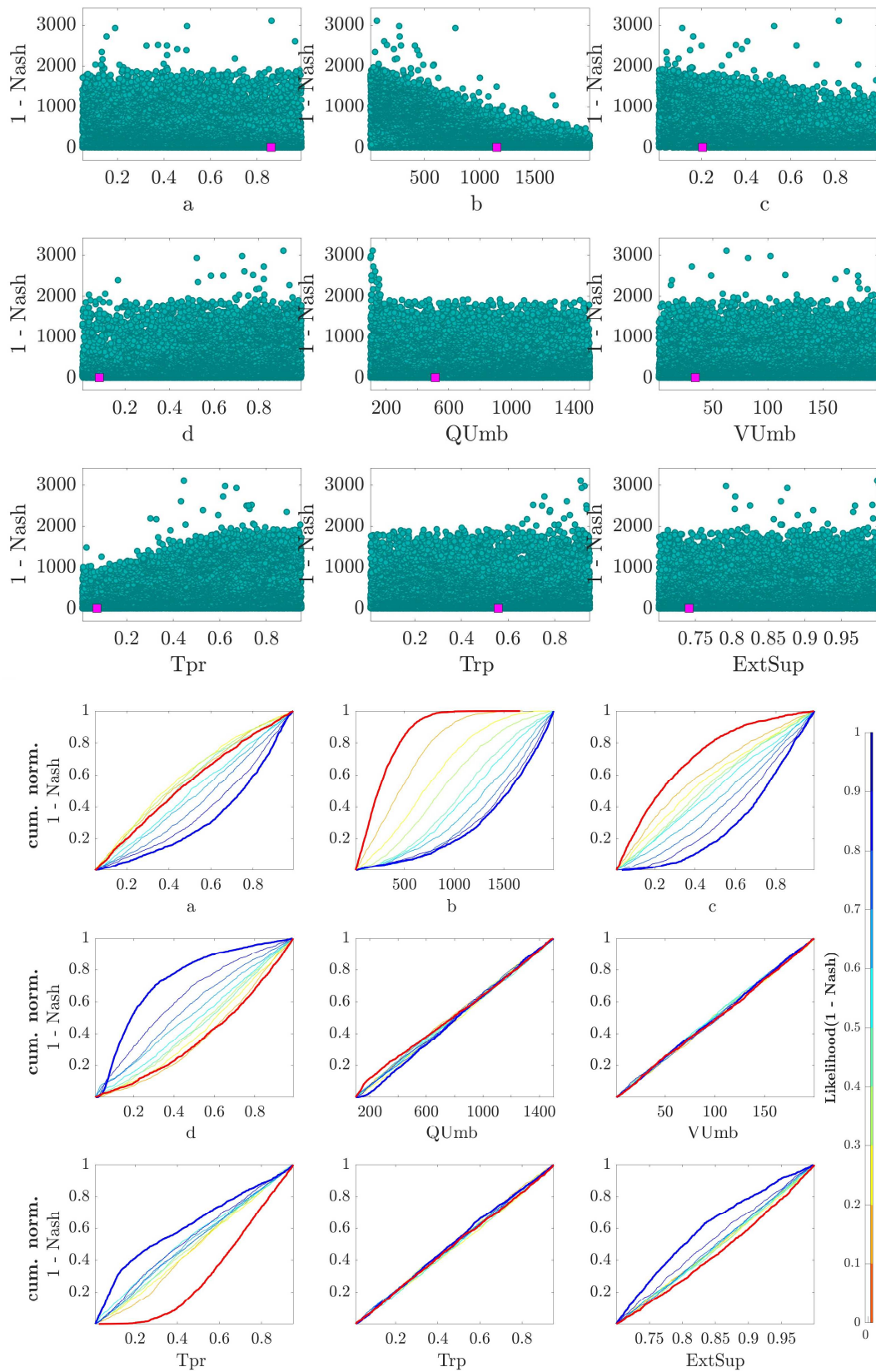
Figura 107. Histograma del coeficiente de Nash - Sutcliffe. a) Calibración. b) Validación.



9.1.6 Desempeño del modelo y análisis de sensibilidad e incertidumbre paramétrica

De acuerdo con las métricas de desempeño obtenidas en los procesos de calibración y validación, se observó que el modelo presenta un ajuste satisfactorio. En este sentido, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad paramétrica apoyándose en la metodología GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation (Beven and Binley, 1992) mediante la herramienta MCAT (Wagener et al., 2000). Con esta herramienta se efectuó el análisis de incertidumbre para generar gráficas de la respuesta del modelo con límites de confianza asociados. En la **Figura 108**, se presentan las gráficas de sensibilidad y dispersión paramétrica (dotty plots), las cuales representan el comportamiento de cada uno de los parámetros con respecto a los valores de la función objetivo, permitiendo la identificación de los parámetros óptimos del modelo, teniendo en cuenta las 10,000 simulaciones realizadas usando el método LHS para calibración.

Figura 108. Dotty Plots y Curvas de sensibilidad paramétrica para Estación Aguaverde [35267080].

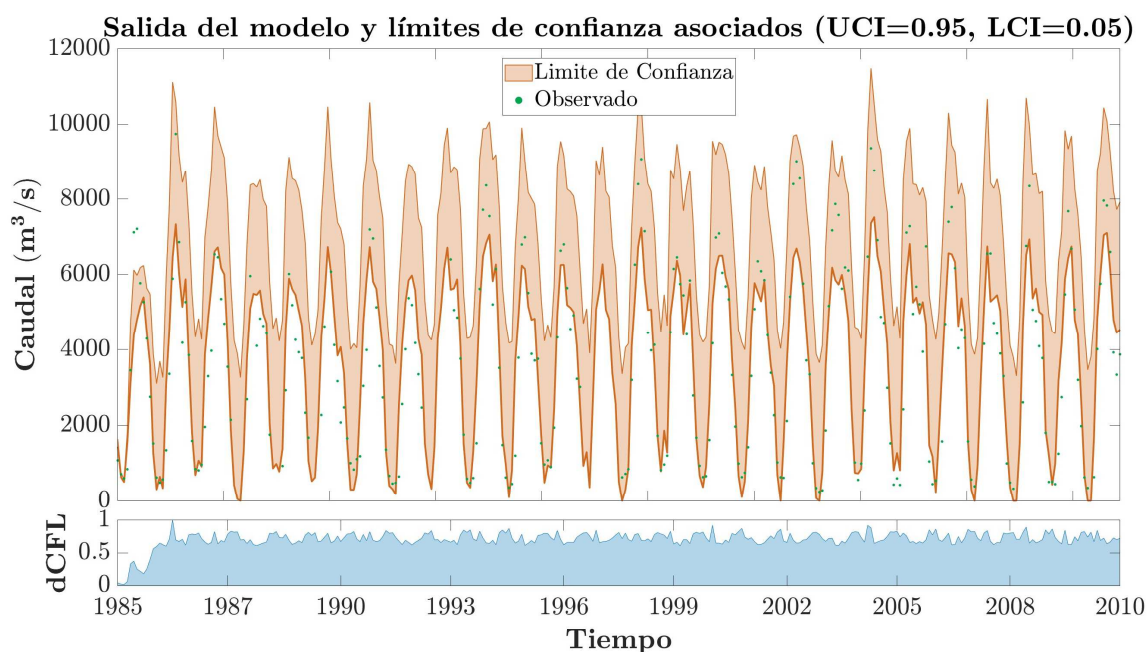


En los Dotty-Plots (gráficos que permite ver el espacio paramétrico muestreado durante el proceso de calibración del modelo) se observa que con el algoritmo de optimización matemática utilizado, se logró realizar un barrido completo del espacio paramétrico definido para el proceso de optimización. Por otra parte, las gráficas de sensibilidad (curvas acumuladas de probabilidad ranqueadas para los rangos de parámetros en los cuales el modelo presenta el mejor desempeño y la mayor sensibilidad a la variación de los parámetros) que se presentan en la **Figura 108** se evidencia que el modelo no presenta una alta sensibilidad para todos los parámetros en uno rangos determinados, excepto para el parámetro b , que controla la humedad del suelo en la zona no saturada.

El color en las curvas identifica la sensibilidad de los parámetros de acuerdo con las evaluaciones realizadas. Las curvas de color rojo demarcan los rendimientos bajos del modelo, mientras que las curvas de color azul demarcan los mejores. Entre mayor sea la pendiente de las curvas de color azul, mayor va a ser la sensibilidad de los parámetros en el rango en el cual dicha pendiente se hace mayor. Esto da lugar a que una variación mínima en el valor del parámetro puede generar una gran variación en los valores de salida de este.

Las bandas de confianza del 95% para las evaluaciones del modelo construido en la estación Aguaverde [35267080] se presentan en la **Figura 109**. En esta grafica se observa que, del espacio paramétrico posible que presenta el modelo, con los parámetros óptimos, es capaz de representar de manera adecuada los caudales medios mensuales en las épocas de sequía y condiciones normales. En otras palabras, estructuralmente el modelo puede representar la hidrología del área en estudio. Sin embargo, en los resultados de calibración se observó que al modelo se le dificulta la representación de los caudales máximos. Este comportamiento obedece principalmente a la compleja estructura espacial que presenta la lluvia, la cual no se logra capturar de manera precisa haciendo uso de un método de interpolación con datos puntuales. No obstante, el comportamiento medio y el rango de valores en los periodos extremos, es acorde con la señal observada.

Figura 109. Análisis de incertidumbre mediante metodología GLUE - estación Aguaverde [35267080]



9.1.7 Simulación de caudales en unidades hidrológicas de análisis

Luego de calibrar y validar el modelo, se llevaron a cabo simulaciones de las series de caudal en las 4243 unidades de análisis, que corresponden a las microcuencas. Estas simulaciones se realizaron tanto para la condición climática histórica como para siete modelos de cambio climático previamente seleccionados, específicamente en la condición ssp585, que se considera la más extrema. Con el objetivo de obtener una única respuesta para el cambio climático, se obtuvo una serie de caudal ensamblada que representa la respuesta hidrológica promedio en la condición de cambio climático ssp585, de acuerdo con lo descrito por los siete GCMs seleccionados.

Las fichas resumen del régimen hidrológico para la VRO la estación Aguaverde [35267080] en los diversos escenarios simulados se encuentran detalladas desde la **Figura 110** hasta la **Figura 117**. Los resúmenes del régimen hidrológico contienen la serie mensual de caudal en la unidad hidrográfica de análisis, los caudales medios, máximos y mínimos mensual multianuales, el diagrama de caja y bigotes, el histograma de frecuencias y las curvas de duración de caudales diarios y mensual.

Figura 110. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición histórica.

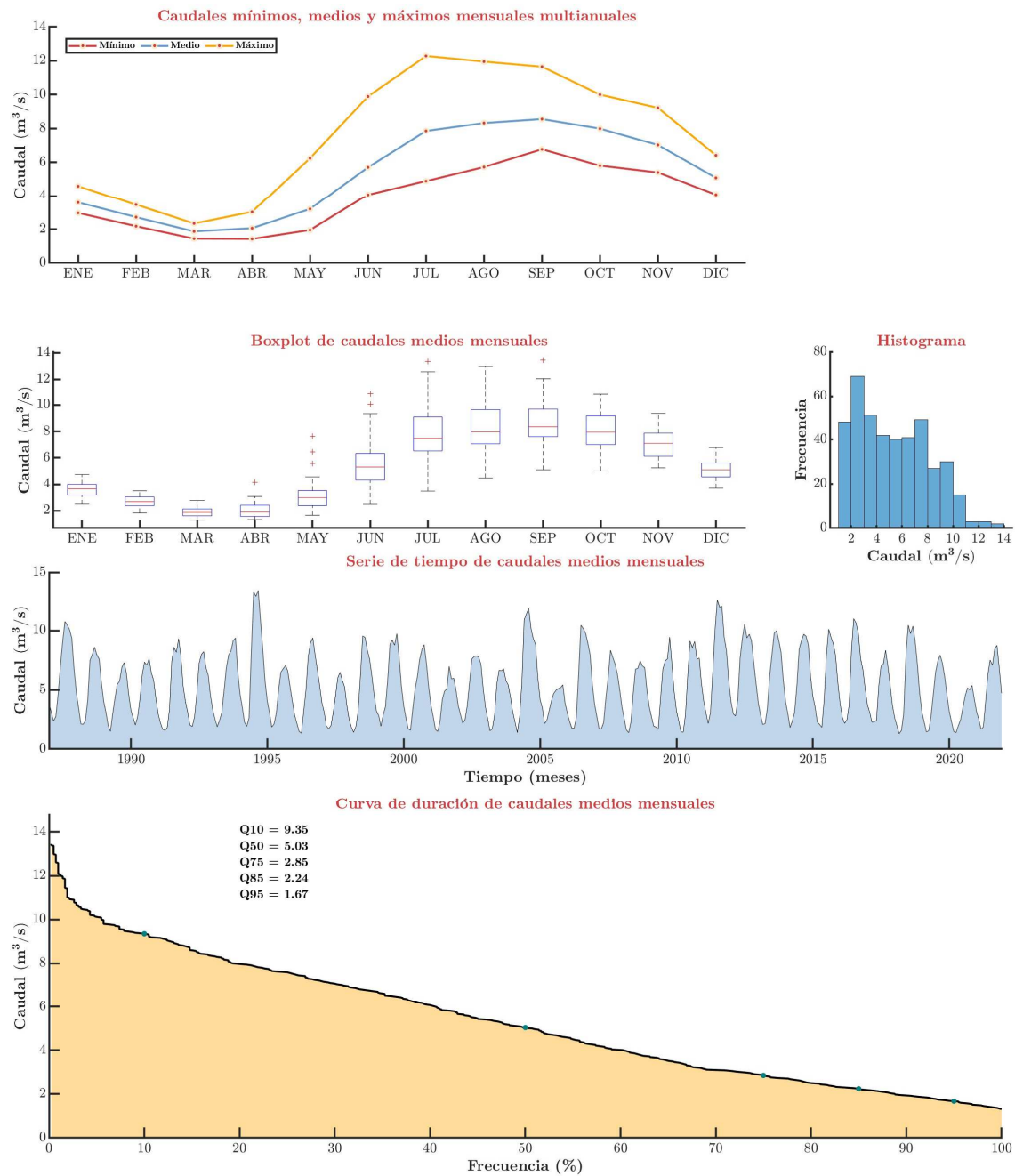


Figura 111 Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo ACCESS-ESM1-5 - ssp585

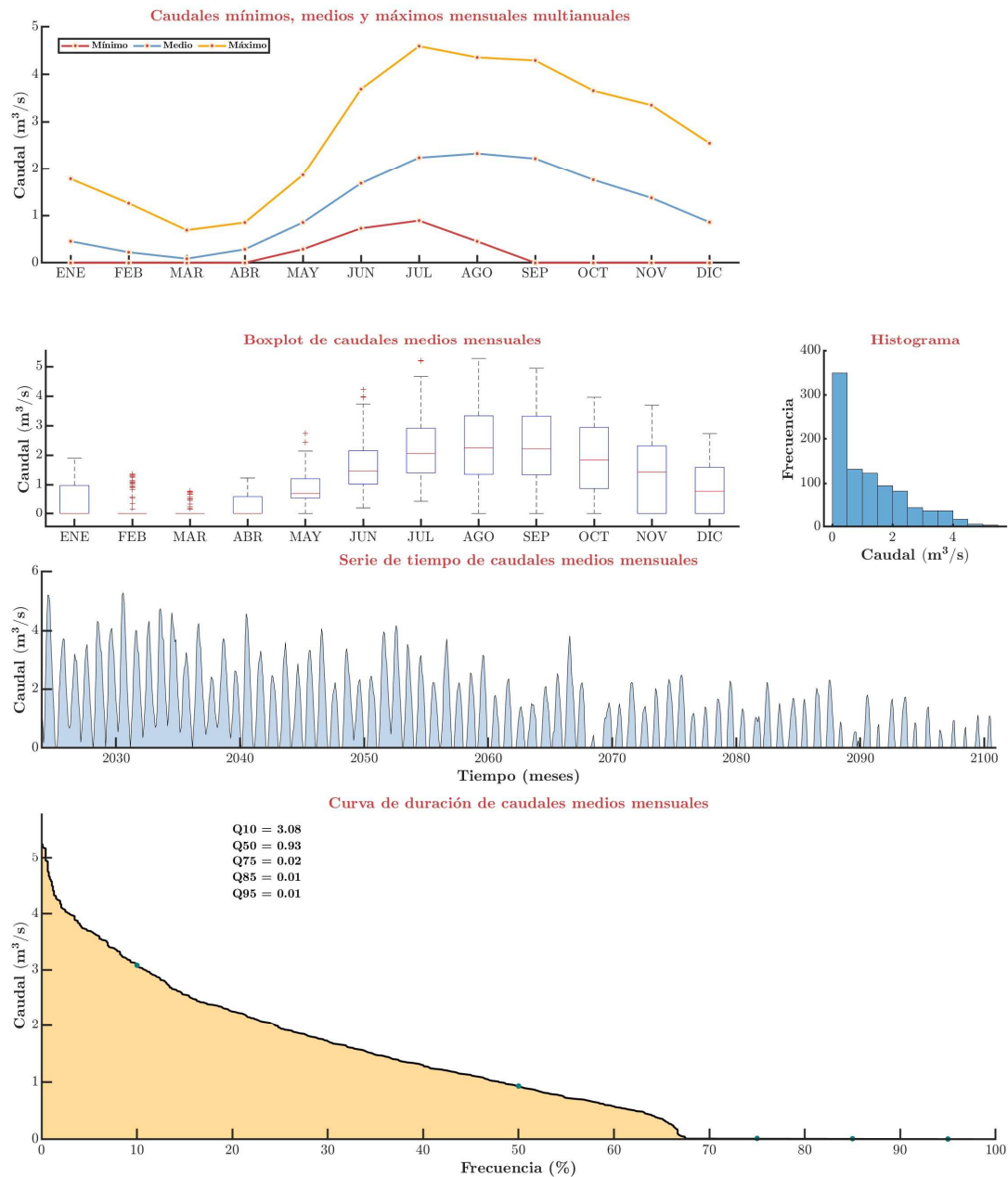


Figura 112. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo CanESM5 – ssp585

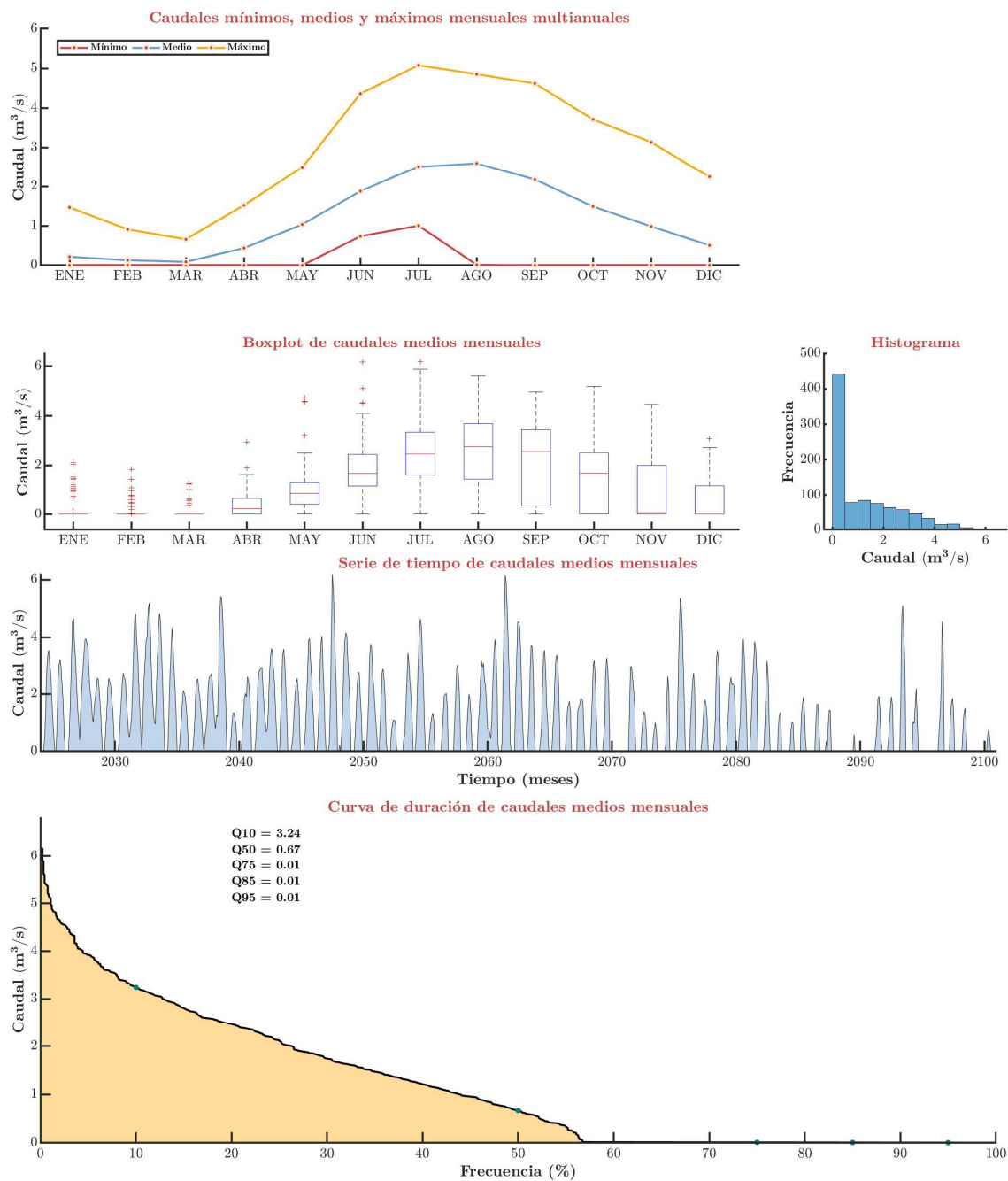


Figura 113. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo CESM2 - ssp585

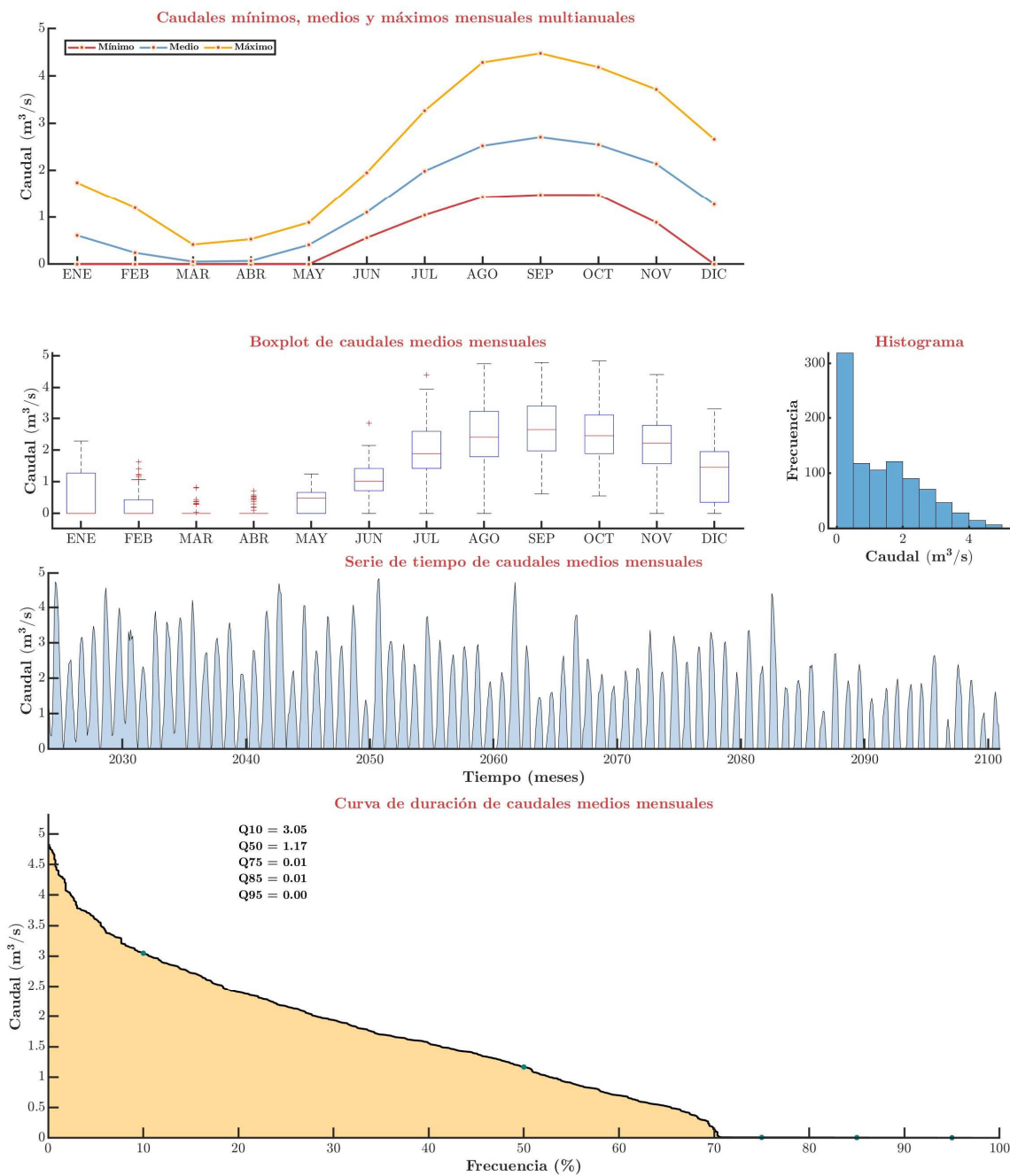


Figura 114. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo EC-Earth3 - ssp585

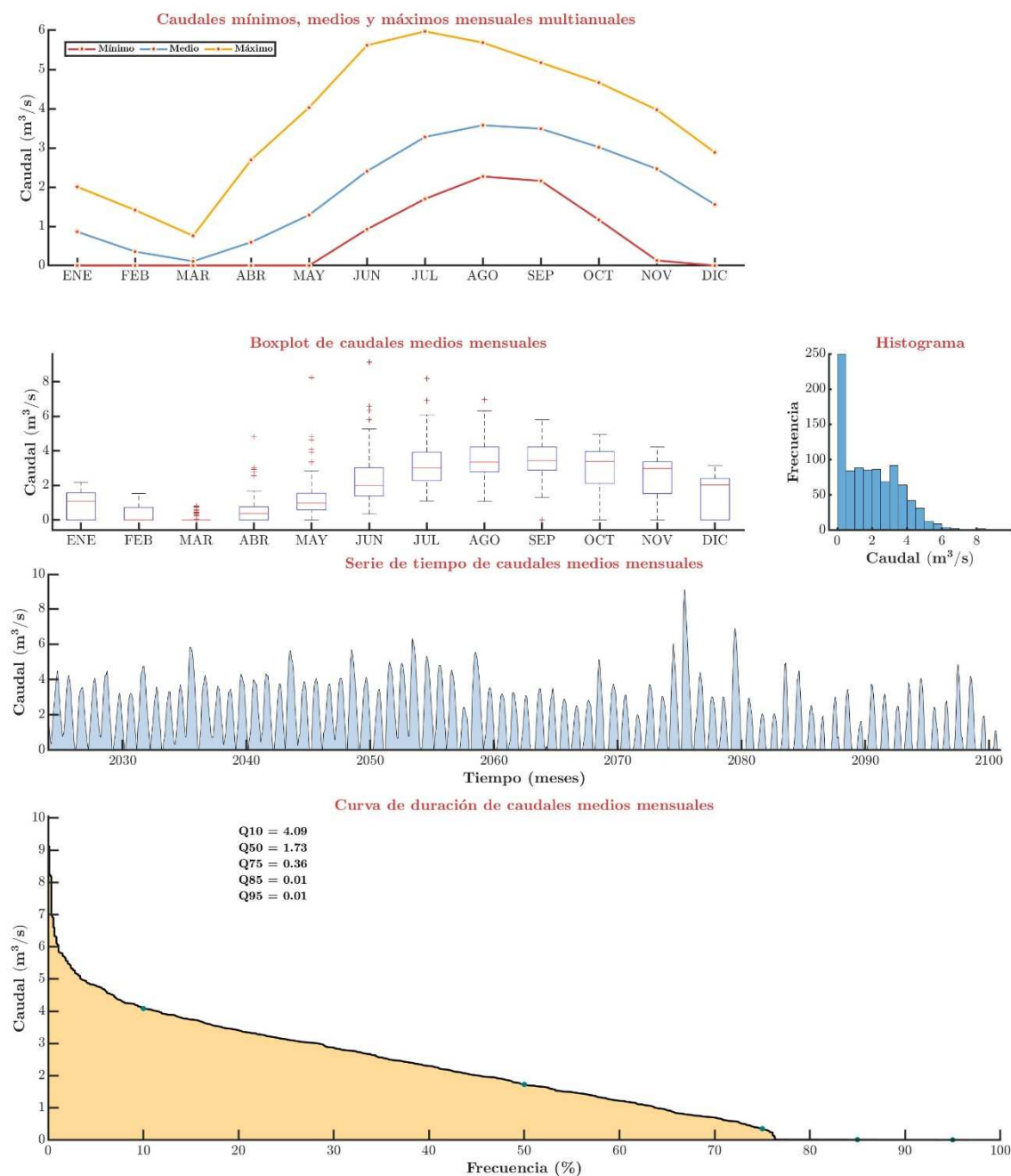


Figura 115. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo MIROC6 – ssp5

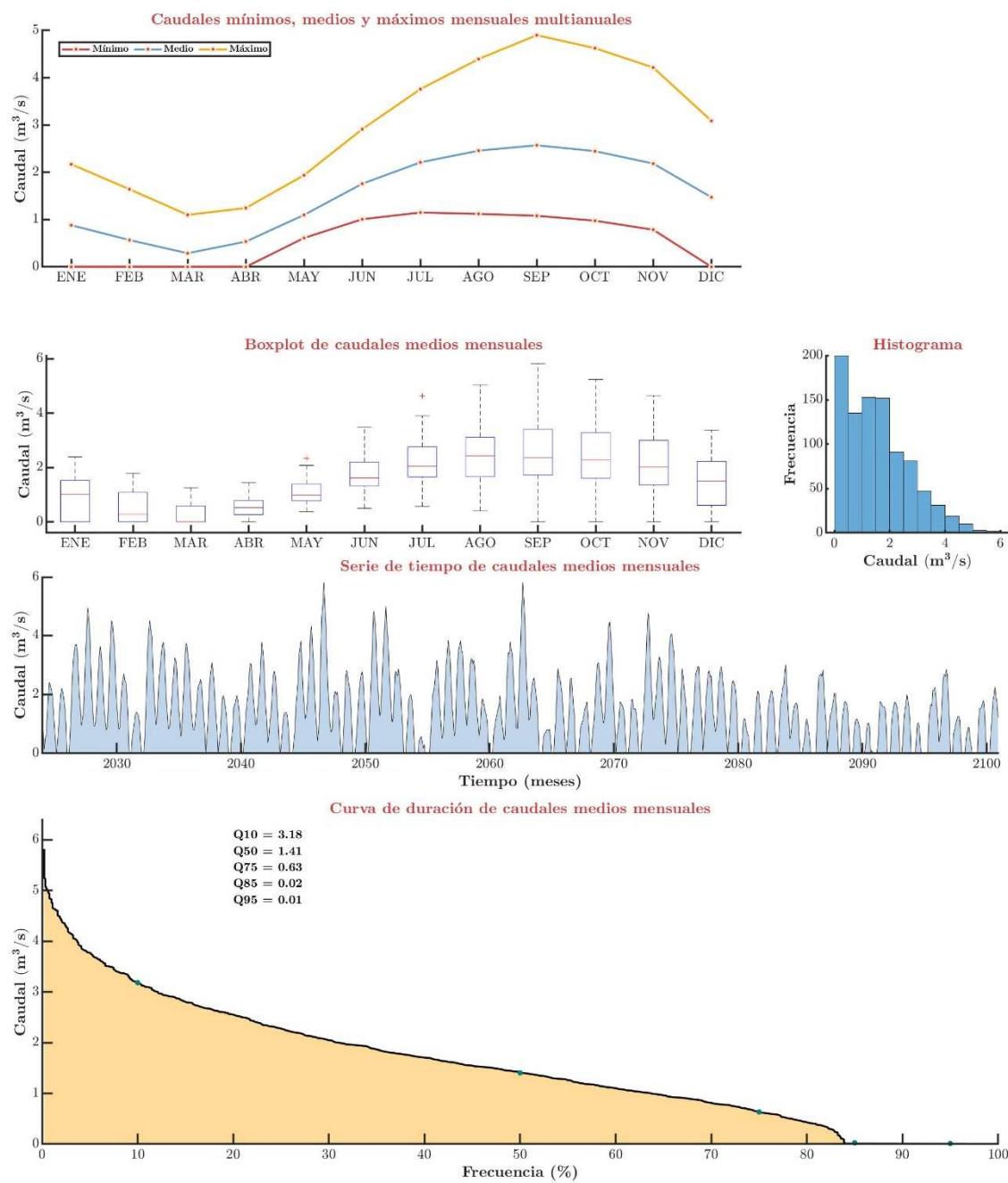


Figura 116. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo MPI-ESM1-2-LR – ssp5

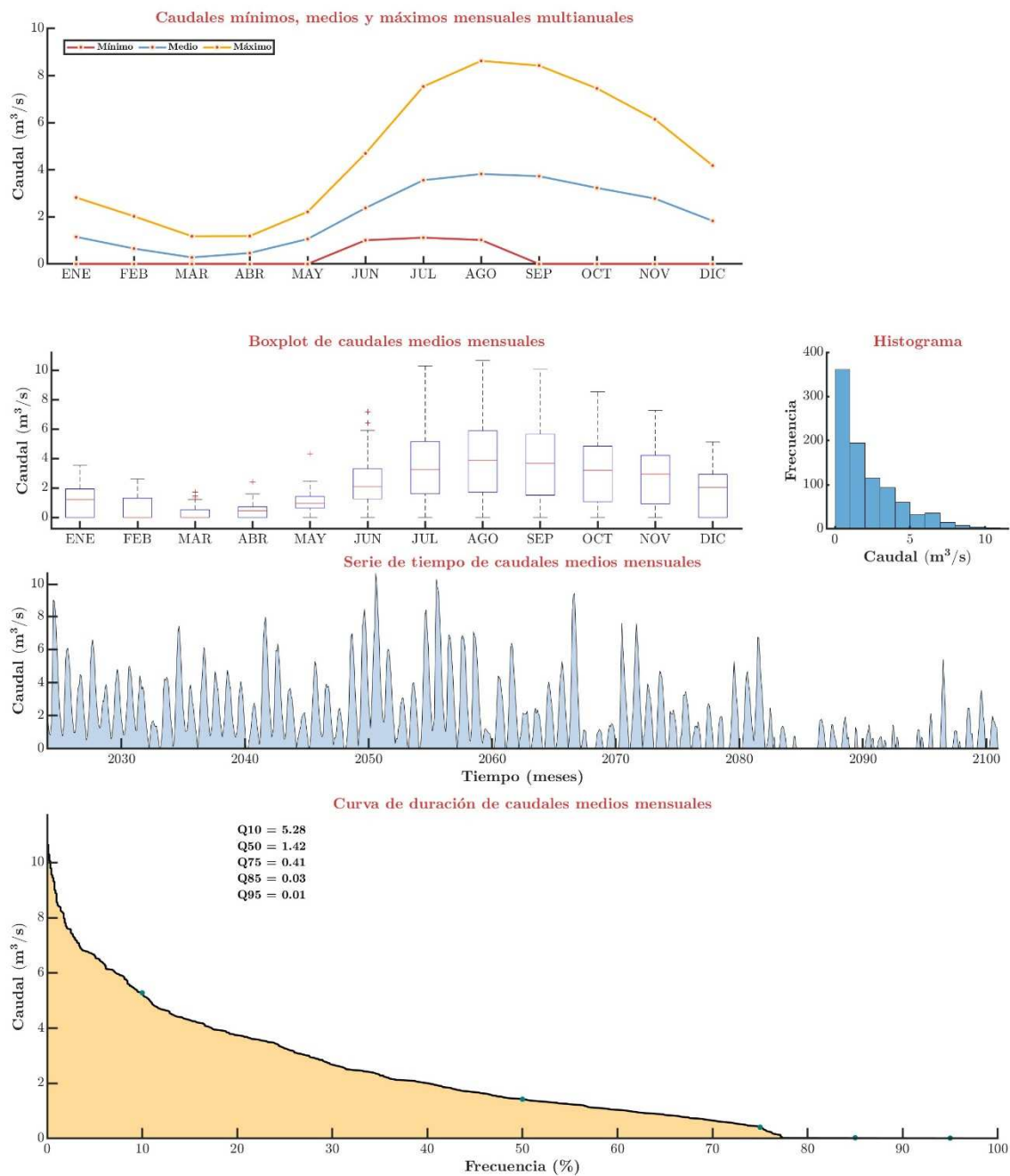
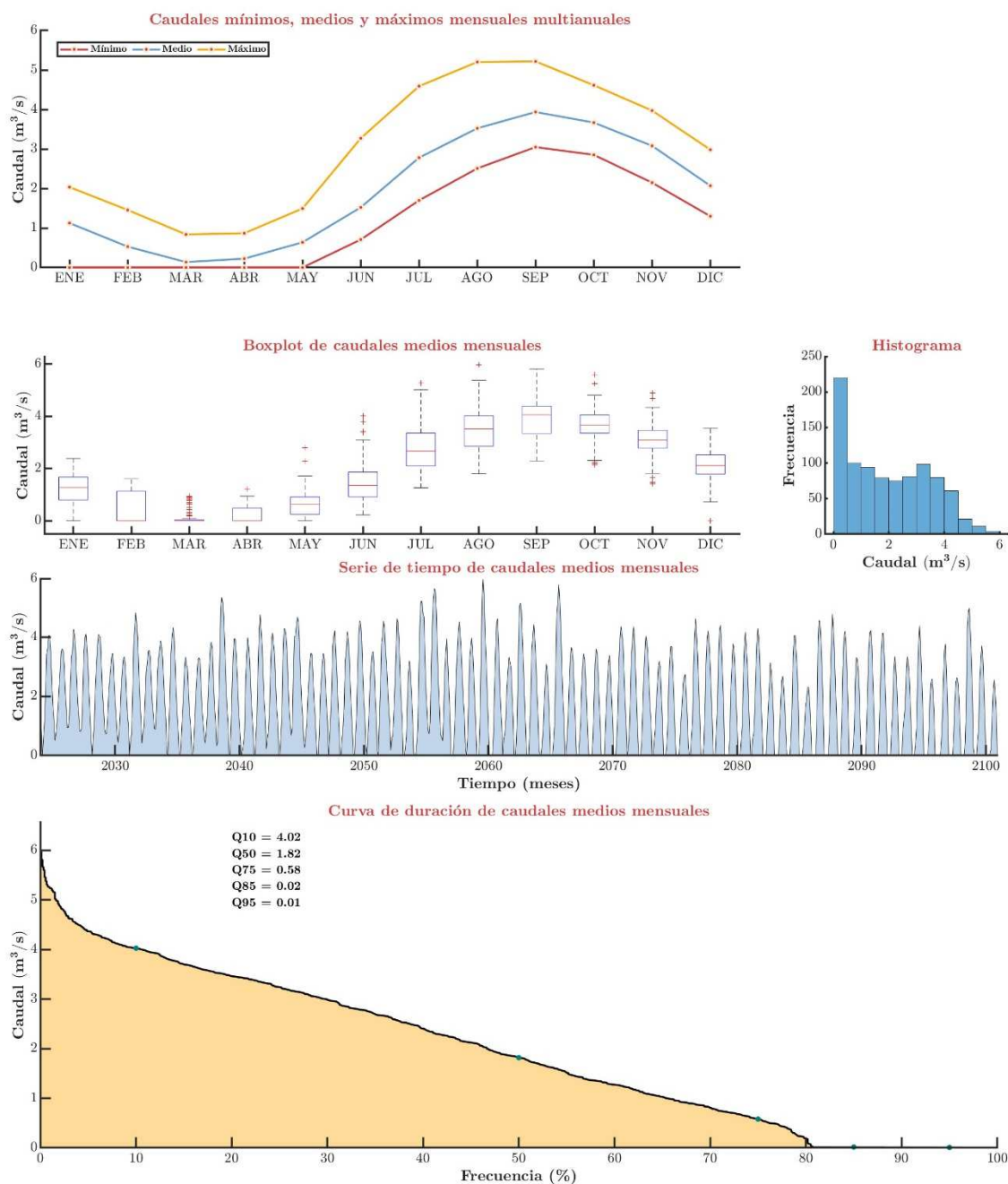


Figura 117. Síntesis del régimen hidrológico de la VRO en la estación Aguaverde [35267080] para la condición de cambio climático descrita por el modelo MRI-ESM2-0 – ssp5



9.1.8 Indicadores de atributo

La estimación de los indicadores de atributo (ver numeral 7.1) se llevó a cabo utilizando las series de caudal simuladas correspondientes a la condición histórica. Para calcular las firmas hidrológicas, se utilizó la herramienta TOSSH (A Toolbox for Streamflow Signatures in Hydrology), desarrollada Gmann et al. (2021). Considerando que los indicadores de atributo tienen como objetivo principal la identificación de los diferentes grupos de agua dulce presentes en la VRO, se procedió a categorizar cada indicador, como se detalla en la **Tabla 37**. La distribución espacial de los indicadores categorizados se visualiza de la **Figura 118** a la **Figura 121**.

Tabla 37. Rangos y valores de los índices de atributos para régimen hidrológico definidos para la agrupación de grupos de agua dulce en la VRO

KEA	Nombre	Índice de tributo	Rango	Descripción
Régimen hidrológico	Caudal medio anual (m3/s)	1	0 – 10	Río de bajo caudal
		2	10 – 100	Río de caudal medio
		3	100 – 1000	Río de caudal alto
		4	1000 – 10000	Río de caudal muy alto
	Pendiente de la curva de duración del caudal	1	-2.98 – -2.10	Río de caudal muy variable
		2	-2.10 – -1.26	Río de caudal de variabilidad media
		3	>-1.26	Río de caudal de variabilidad baja
	Duración del caudal alto (meses)	1	1.0 – 1.5	Caudal alto de duración baja
		2	1.5 – 2.5	Caudal alto de duración media
		3	2.5 – 3.5	Caudal alto de duración alta
		4	3.5 – 4.5	Caudal alto de duración muy alta
	Semestre de medio flujo (meses)	1	-	El caudal medio se alcanza en la primera mitad del año
		4	-	El caudal medio se alcanza en la segunda mitad del año.
	Frecuencia del caudal máximo	1	-	Un pico al año
		4	-	Dos picos al año

A nivel general, los resultados dejan ver que la gran mayoría de los ríos en la VRO presentan caudales altos, lo cual concuerda con su morfología y el patrón acumulativo de caudales en la región. Ríos principales como el Inírida, Guaviare, Meta, Tomo, se caracterizan por tener caudales elevados.

Así mismo, la **Figura 119** muestra que existe una baja prolongación en el sentido temporal, de caudales altos, asociada a una baja variabilidad en relación con el área de la cuenca. Esto indica que los caudales altos no muestran una respuesta instantánea. Lo anterior, puede atribuirse a las bajas pendientes y a la densa cobertura vegetal del bosque en esta zona, que actúa como un amortiguador de la dinámica hidrológica. Por otro lado, la **Figura 120** muestra la tasa de cambio en el régimen hidrológico, en función de la pendiente de la curva de duración de caudales. Se observa que la parte baja experimenta las mayores variaciones, mientras que la parte media y baja muestra mayor variabilidad. Un aspecto de interés adicional es que la mayoría de los ríos que conforman la VRO exhiben un régimen de un solo máximo. Esta distribución de los caudales a lo largo del año está vinculada a la mayor actividad convectiva asociada al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre la geografía colombiana, así como a su interacción con las circulaciones de los océanos Pacífico y Atlántico, y la cuenca del Amazonas (J. Vélez et al., 2000); Amazonas (Vélez et al., 2000).

Figura 118. Distribución de magnitud del régimen hidrológico (Caudal medio anual) en la VRO

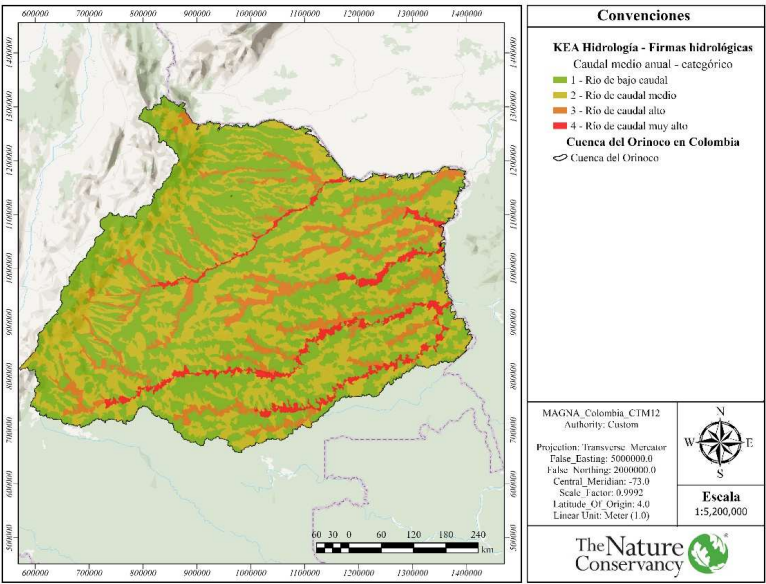


Figura 119. Distribución de duración del caudal alto en la VRO

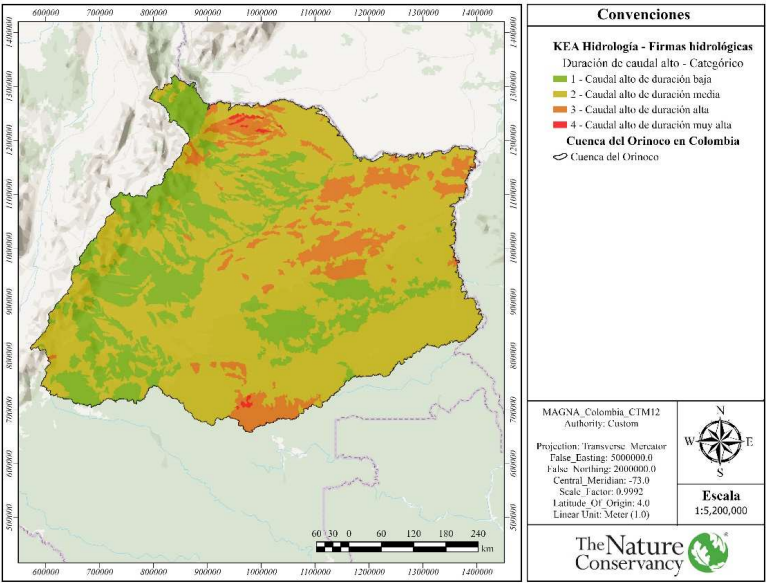


Figura 120. Distribución de tasa de cambio del régimen hidrológico (Pendiente de la curva de duración del caudal) en la VRO

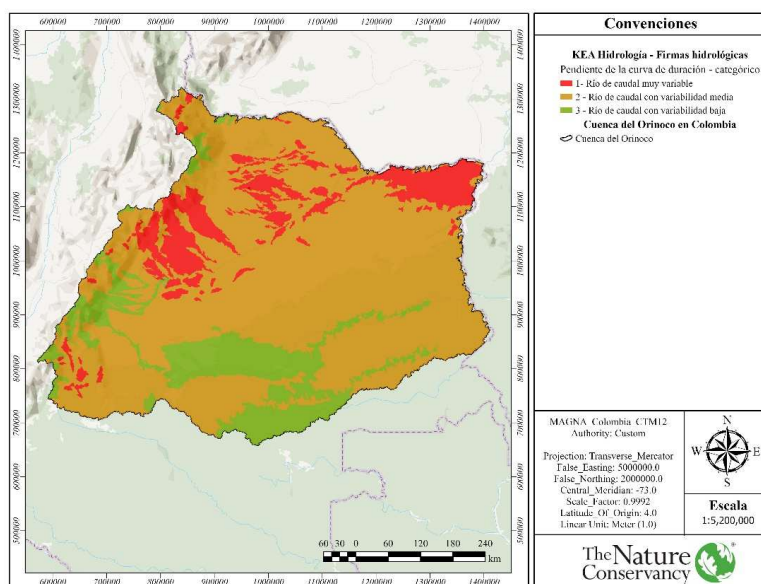
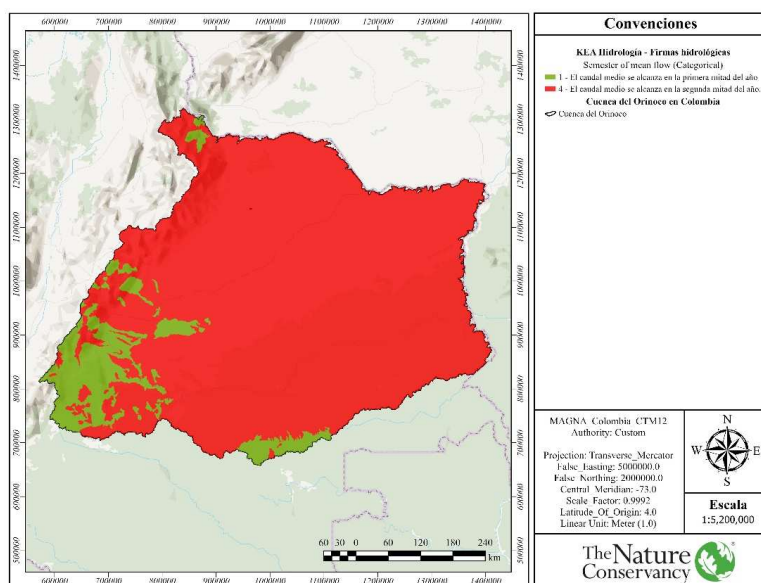


Figura 121. Distribución de tiempo del régimen hidrológico (Semestre de medio flujo) en la VRO

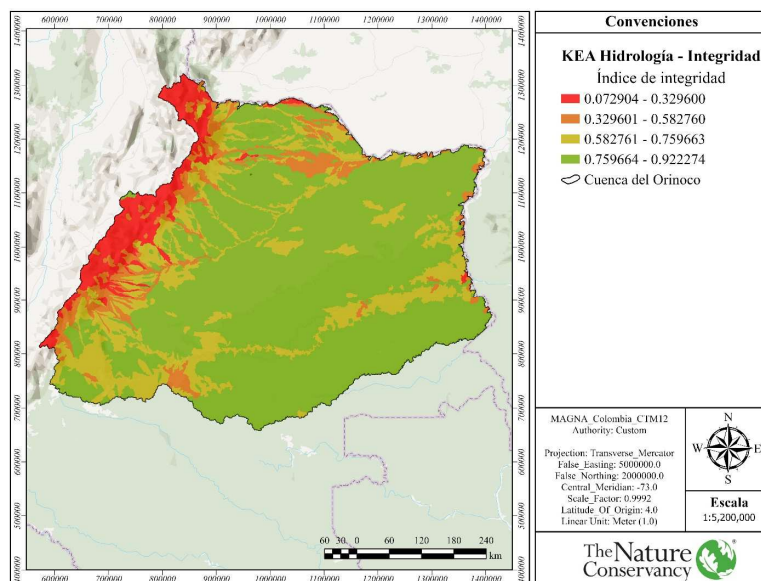


9.1.9 Indicadores de integridad

Utilizando las series de caudal simuladas tanto para la condición histórica como para la condición de cambio climático ensamblada (construida a partir de las series de caudal de los seis Modelos de Circulación General), se estimaron las curvas de duración de caudales utilizando la herramienta TOSSH (A Toolbox for Streamflow Signatures in Hydrology), desarrollada Gnann et al. (2021). De ambas curvas, se extrajeron los percentiles cada 5% y con estos se procedió a calcular el indicador de integridad seleccionado en el numeral 8.1, que se puede apreciar en la **Figura 122**. En términos generales, se observa que la integridad hidrológica podría verse mayormente afectada en la zona alta de la cuenca. Según el indicador seleccionado, el régimen de caudales podría variar hasta en un 92%. Esto implica la posibilidad

de una reducción que resultaría en una menor disponibilidad de agua. Este fenómeno podría agravarse debido a las presiones antropogénicas, en particular la deforestación y la ganadería que caracterizan esta área, lo que podría tener efectos negativos en los ecosistemas de agua dulce.

Figura 122. Índice de integridad asociado al régimen hidrológico para la VRO

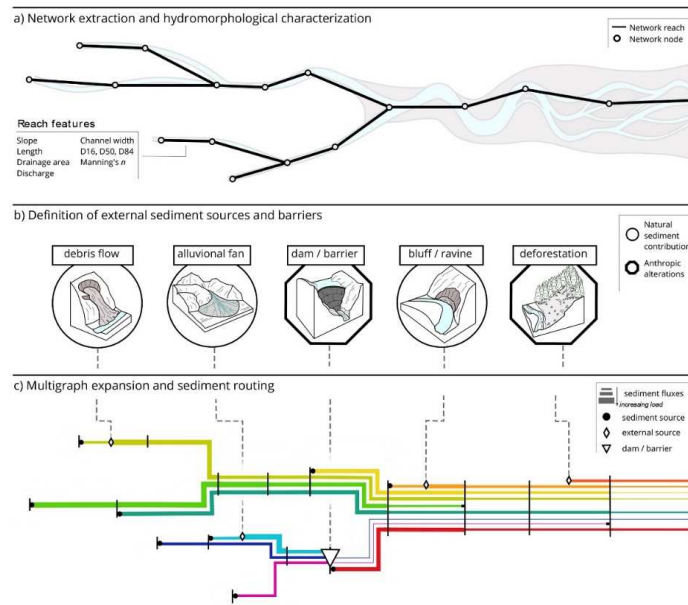


9.2 KEA – Flujo de sedimentos

Los sedimentos desempeñan un papel esencial en los ecosistemas de agua dulce, como ríos y humedales, ya que la cantidad y distribución de estos afectan directamente a los hábitats de diversas comunidades funcionales que dependen de su presencia. Normalmente, la dinámica natural de los sedimentos en una cuenca hidrográfica está determinada por factores biofísicos como la topografía, la vegetación, los usos del suelo, el tipo de suelo, el clima y el régimen hidrológico. Cualquier alteración en estos elementos con respecto al comportamiento natural puede tener consecuencias significativas en la estructura y la integridad física, química y biológica de los ecosistemas acuáticos de agua dulce (DFO, 2000). Por tanto, es crucial comprender su comportamiento.

Para el caso de la VRO, la caracterización del transporte de sedimentos de fondo se realizó mediante el modelo CASCADE (**CA**tchment **S**ediment **C**onnectivity **And** **DE**livery) (Schmitt et al., 2016); una herramienta de modelación metamatemática que ofrece la capacidad de representar la dinámica del transporte de sedimentos de una red fluvial en grandes cuencas hidrográficas (Tangi et al., 2019). Entre las múltiples ventajas que ofrece CASCADE, se encuentra la capacidad de considerar tanto las fuentes como los sumideros (e.g. barreras o presas) de sedimentos presentes en la red fluvial (ver **Figura 123-B**). Permite además llevar a cabo un seguimiento preciso de los balances de sedimentos diferenciados según el tamaño de las partículas, al mismo tiempo que provee varios enfoques empíricos para el análisis del transporte de sedimentos a nivel de red fluvial (ver **Figura 123**). La descripción detallada del modo de funcionamiento y configuración puede ser consultada en el trabajo de Tangi et al. (2019).

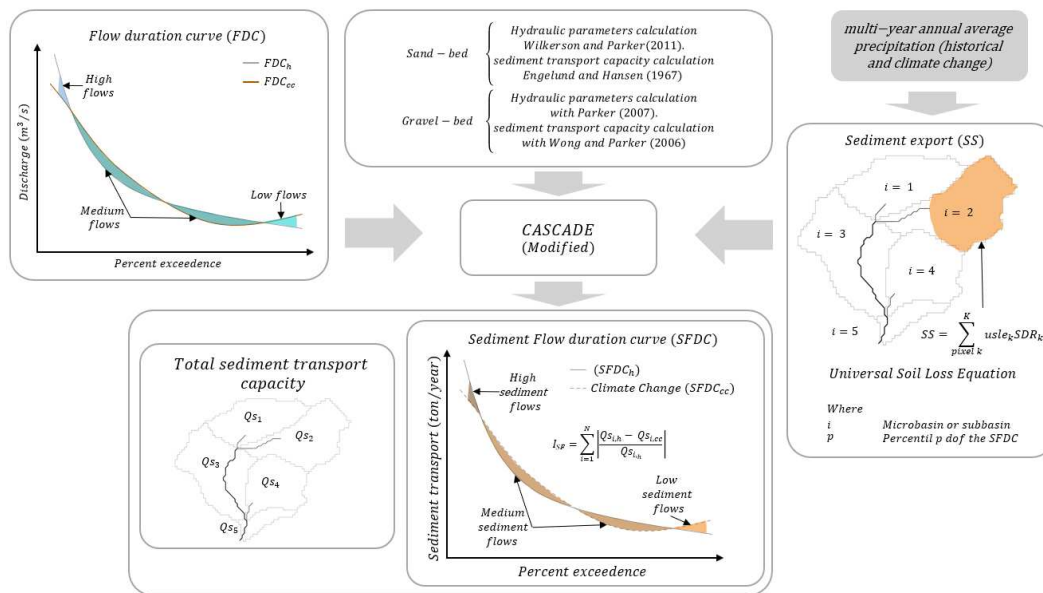
Figura 123. Representación del marco CASCADE



Fuente: Tangi et al. (2019)

Por su parte, el aporte de sedimentos en suspensión se determina mediante el concepto de *Sediment Delivery Ratio* - SDR. El anterior, puede verse como un factor de ajuste a la *Revised Universal Soil Loss Equation* - RUSLE (Renard et al., 1996). En general, el SDR alude a la proporción de pérdida de suelo que realmente llega a la corriente y que está en función del tipo de cobertura, la pendiente del terreno y el tipo de material. En general la esquematización del proceso de cálculo para determinación de los índices de atributo e integridad para el flujo de sedimentos se puede apreciar en la **Figura 124**.

Figura 124. Representación esquemática del cálculo de los dos grupos de índices del flujo de sedimentos



La información utilizada para la caracterización del KEA de Flujo de Sedimentos, así como los modelos y herramientas de análisis pueden ser consultadas en el **Anexo 2**.

9.2.1 Configuración del modelo CASCADE

De acuerdo con lo indicado por Tangi et al. (2019), CASCADE requiere configurar la red fluvial de la cuenca de análisis, asignado a cada tramo aferente una serie de parámetros hidrológicos, hidráulicos y morfológicos. La **Tabla 38** sintetiza de manera completa los parámetros indispensables que CASCADE requiere para llevar a cabo una ejecución.

Tabla 38. Parámetros de entrada de CASCADE

Parámetro	Unidad	Descripción
ID	-	Identificador único del tramo de red fluvial
FromNode	-	Código del nodo inicial del tramo de red fluvial
ToNode	-	Código del nodo final del tramo de red fluvial
S	[m/m]	Pendiente del tramo de la red fluvial.
L	[m]	Longitud del tramo de la red fluvial.
Ad	[m ²]	Área de drenaje acumulada hasta el tramo de la red fluvial.
Q	[m ³ /s]	Caudal líquido
Wb	[m]	Ancho del canal del tramo de red fluvial.
D ₁₆ , D ₅₀ , D ₈₄	[m]	Distribución del tamaño de grano de los sedimentos en la superficie del lecho del río. 16%, 50% y 84% de la curva granulométrica.
n de Manning	[s/m ^(1/3)]	Coefficiente de rugosidad de Manning para el material del lecho en el canal.

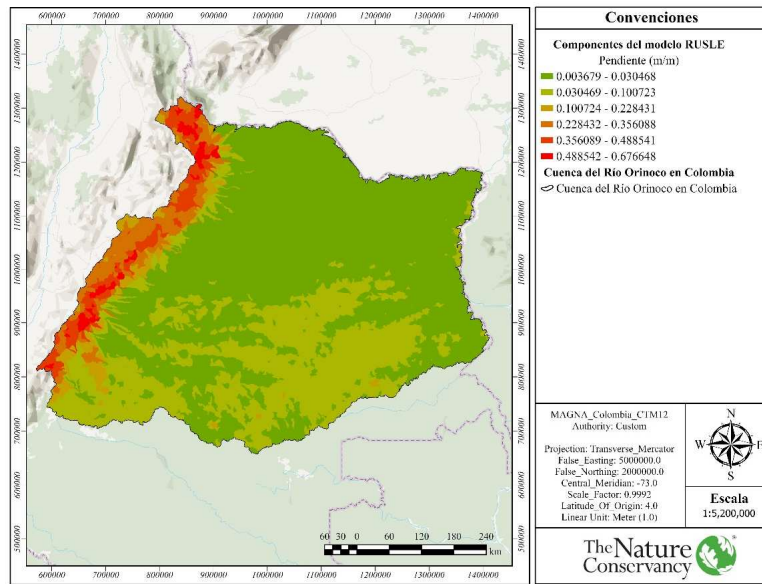
Fuente: Tomada de Tangi et al. (2019)

Para la VRO, la configuración de CASCADE se realizó utilizando la red fluvial correspondiente a las 4243 unidades de análisis definidas. Así mismo, para el análisis del transporte de sedimentos, se realizaron modificaciones sobre los códigos originales del modelo. Entre las modificaciones realizadas estuvieron:

- Limitación del análisis de transporte de sedimentos a la condición promedio (tamaño de grano del 50% - D_{50})
- Ejecución de las ecuaciones de transporte de Engelund & Hansen (1967) and Wong & Parker (2006) para tramos con lecho de arena y grava respectivamente.

En línea con lo anterior, los parámetros de longitud y área de drenaje acumulada se derivaron de operaciones espaciales realizadas sobre la red fluvial usando el software ArcGIS Pro. Los parámetros de conectividad (FromNode y ToNode) se estimaron a través de la herramienta de análisis espacial ArcHydro Tools de ArcGIS Pro. Asimismo, la pendiente de los tramos de red fluvial se obtuvo a través del modelo de elevación digital de terreno (DEM) de 90 m de resolución. Con estos y los datos de longitud, se estimó la pendiente promedio de cada tramo de red fluvial (m/m). La distribución espacial de los valores de pendiente obtenidos se presenta en la **Figura 125**.

Figura 125. Distribución espacial de las pendientes de los tramos de red fluvial de la VRO.

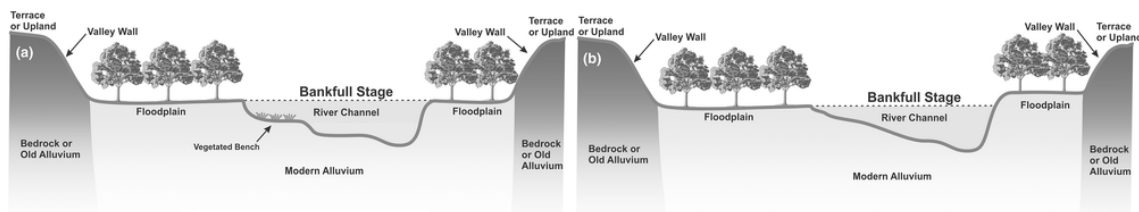


Se observa que existe una concentración de las pendientes más pronunciadas (con valores superiores a 0.2 m/m) en la parte alta de la cuenca, específicamente en la cadena montañosa de la Cordillera de los Andes. No obstante, también se registran pendientes bajas en esta zona, dada la localización del Embalse de Chivor (0.02 m/m). De otro lado, más del 80% de los tramos de red fluviales de la VRO exhiben pendientes reducidas, cercanas a los 0.002 m/m. tratándose de una zona geográficamente plana.

9.2.1.1 Caudal de banca llena

Desde la perspectiva de la morfología fluvial, el caudal de banca llena guarda una estrecha relación con el concepto de caudal de formación. Según Bjerklie (2007), el caudal de formación se relaciona con la comprensión de que la configuración del cauce de un río tiende a mantener su estabilidad a lo largo del tiempo. Esto está ligado a eventos de alto flujo que ocurren con frecuencia y que cuentan con la suficiente energía de corriente para establecer y mantener la geometría del cauce. Estos eventos erosionan las orillas y desplazan la carga del fondo, y su magnitud coincide con la capacidad del cauce, es decir, el caudal de banca llena. El concepto de caudal de banca llena se muestra detalladamente en la **Figura 126**.

Figura 126. Representación esquemática de la condición de banca llena para (a) bancos de canales de la misma elevación y (b) bancos de canales con diferentes elevaciones.

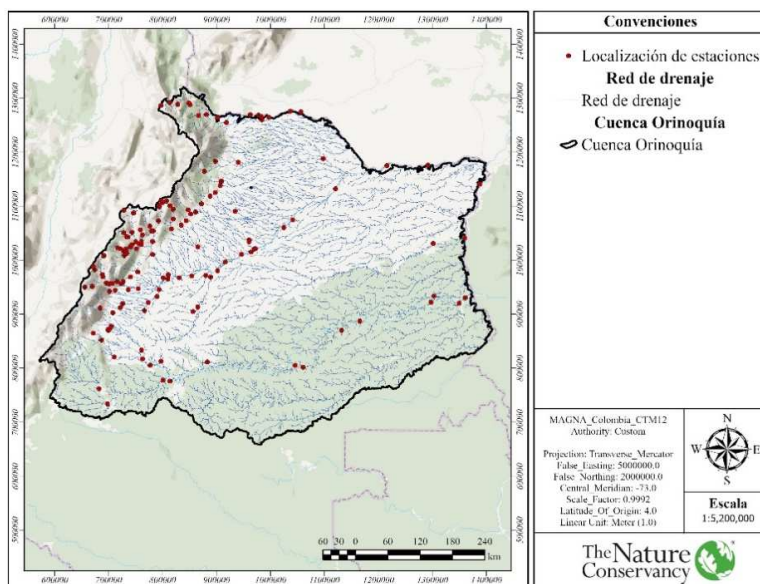


Fuente: Van Campenhout et al. (2020)

Estudios realizados por Ahilan et al. (2013), indican que el período de recurrencia del caudal de banca llena puede variar entre 2.33 y 10 años. Sin embargo, el valor más ampliamente utilizado es el correspondiente a un período de recurrencia de 2.33 años (Lindroth et al., 2020). Para efectos de este análisis, se ha considerado el caudal de 2.33 años ($Q_{2.33}$) como caudal de banca llena. Para

estimar el $Q_{2.33}$, se consideraron los caudales diarios observados de las estaciones en la zona y asumiendo los anteriores como una variable aleatoria. La localización de las estaciones se encuentra ilustrada en la **Figura 127**. Bajo este supuesto, es posible identificar cuál es la función de densidad de probabilidad (Probability Density Function - PDF en inglés) que mejor caracteriza los caudales en un tramo de red (Ven Te Chow et al., 1994). En línea con esto, para cada tramo se evaluaron 12 PDF teóricas: *Nakagami*, *G-Extreme Value (GEV)*, *Normal*, *Lognormal*, *Gamma*, *Gumbel*, *Weibull*, *Exponencial*, *tLocationScale*, *Generalizada de Pareto*, *Logistic* y *LogLogistic*. El detalle de la estructura matemática de cada PDF puede ser consultado en (Ven Te Chow et al., 1994).

Figura 127. Localización de estaciones para obtención de $Q_{2.33}$



Metodológicamente, se calcula la frecuencia empírica mediante la ecuación propuesta por Weibull tal como lo describe Domínguez (2016b). Luego, se selecciona el mejor ajuste de PDF mediante dos criterios: a) el menor valor de la raíz del error cuadrático medio (Root Mean Square Error - RMSE en inglés) y b) a través de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, con un nivel de significancia del 95%.

• Prueba de Kolmogorov – Smirnov

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(X_m)$ y la estimada $F(X_m)$

$$D = \max |F_o(X_m) - F(X_m)|$$

Con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado. Si $D < d$, se acepta la hipótesis nula, es decir, que los datos provienen de la distribución de probabilidad escogida. La función de distribución de probabilidad observada o empírica se calculó como se muestra en la ecuación.

$$F_o(X_m) = 1 - \frac{m}{n + 1}$$

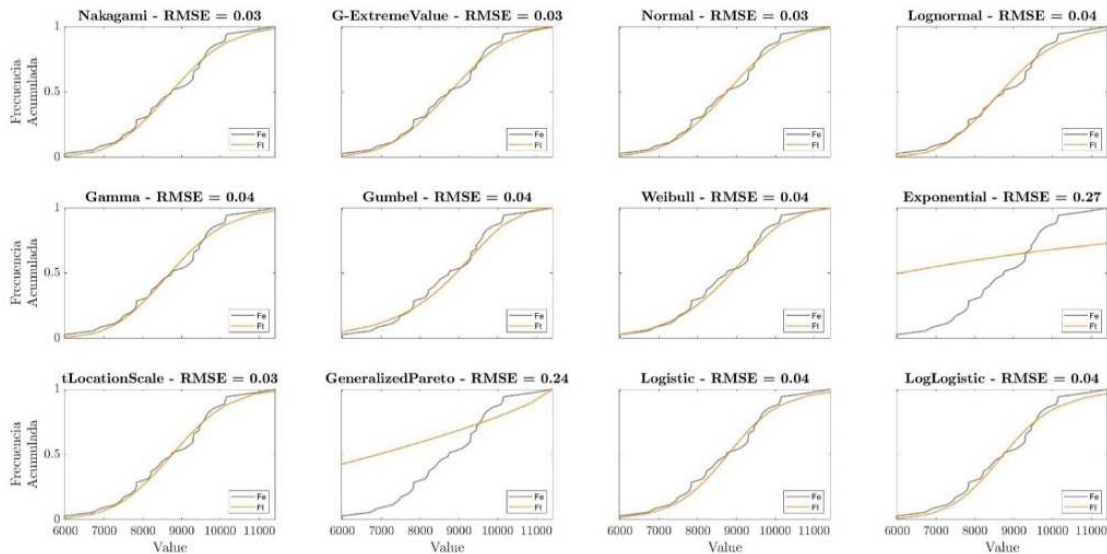
- **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)**

El RMSE es una medida de la discrepancia entre los valores simulados (X_i) y los valores observados ($\widehat{X}_i$), expresada en la misma unidad de medida que los datos originales. Matemáticamente, el RMSE se calcula como:

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\widehat{X}_i - X_i)^2 \right]}$$

A manera de ejemplo, la **Figura 128** muestra el proceso de bondad de ajuste para las PDF mencionadas sobre la estación Aguaverde [35267080]. Las gráficas corresponden a los caudales diarios máximos en la condición histórica (periodo comprendido entre los años 1985 y 2021). En general, se puede observar que la mayoría de las PDF evaluadas presentan un nivel aceptable de ajuste a los datos empíricos. Sin embargo, es importante resaltar que en el caso específico de la estación Aguaverde, la PDF teórica que mejor se ajusta es la distribución GEV. Este resultado sugiere que, entre las PDF consideradas, la distribución GEV es la que ofrece la representación más precisa y coherente con los caudales observados en esta ubicación en particular.

Figura 128. PDF evaluadas para los caudales de la estación Aguaverde [35267080] (UHA-574), para los caudales máximos mensuales en la condición histórica



Seguidamente, se determina la PDF que presenta mejor ajuste a cada una de las 12 distribuciones de probabilidad mencionadas, para cada una de las UHA relacionadas con las estaciones de caudal que se ubican sobre ellas y que fueron utilizadas en el proceso de calibración. Con ello, se calcula el caudal de banca llena Q_{bf} , para el periodo de retorno de 2.33 años, es decir se determina el valor del caudal de banca llena para una probabilidad de excedencia del 42.9%:

$$P(x \leq X) = \frac{1}{T} = \frac{1}{2.33} = 0.429$$

Ahora, con el ánimo de asignar un valor de Q_{bf} a cada una de las 4243 UHA analizadas, se genera una relación potencial entre el área acumulada de la cuenca hasta la estación de calibración. La **Figura 129** muestra la relación mencionada y graficada en escala logarítmica, entre Q_{bf} y el área acumulada, en km².

A partir de la regresión anterior, la **Figura 130** presenta la distribución espacial para toda la VRO de los caudales máximos para el periodo de retorno de 2.33 años en la condición histórica.

Figura 129. Relación entre el caudal de banca llena y el área acumulada de la cuenca hasta la estación de calibración

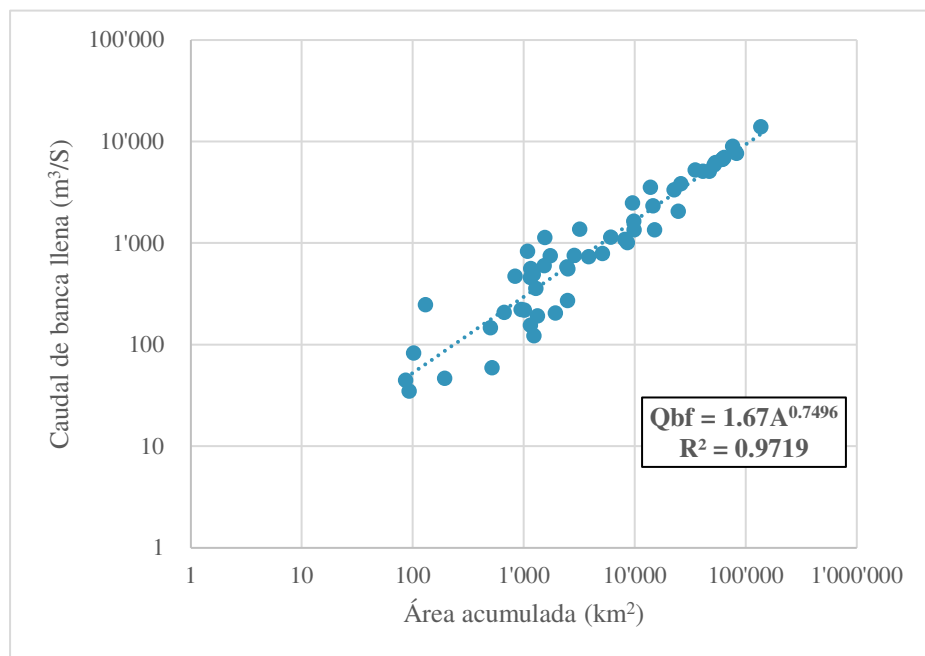
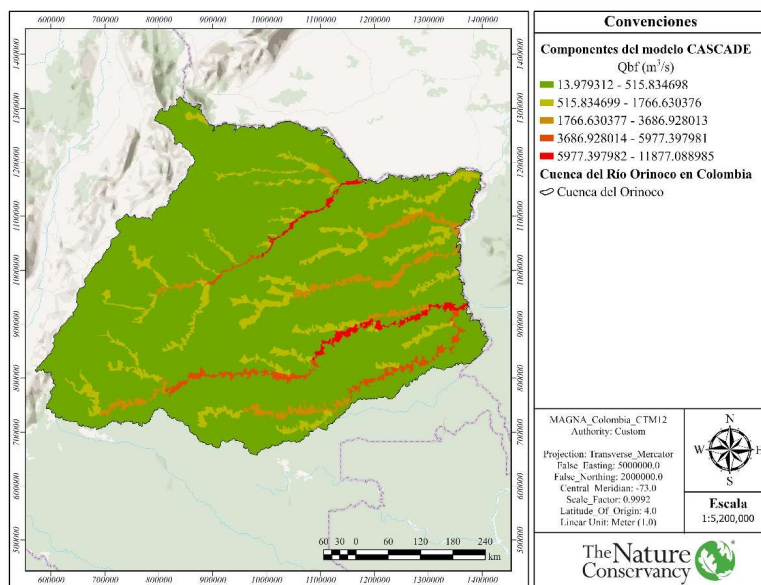


Figura 130. Distribución espacial de los caudales medios diarios máximos para el periodo de retorno de 2.33 años en la condición histórica.



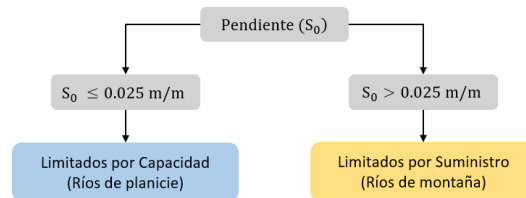
9.2.1.2 Tamaño medio de partícula – D50

El modelo CASCADE, utiliza el tamaño de partícula de origen para estimar el tamaño mediano de partícula o D_{50} . Para esto, plantean una serie de relaciones que integran lo estimación de los esfuerzos de corte en el lecho y parámetros de movilidad del sedimento (e.g. parámetro de movilidad de Shields), donde para resolverlas asumen que:

- Solo las fracciones más grandes de la mezcla de tamaño de grano en un tramo no son arrastradas en condiciones de flujo de banca llena.
- El flujo es constante en toda la cuenca y para todas las etapas de flujo, se reemplaza la pendiente de energía con el gradiente medido a partir del DEM. La geometría del canal es rectangular para todos los canales.
- El factor de fricción es constante y es derivado de la literatura. El factor de fricción lo consideran independiente del tamaño del grano y no tiene en cuenta la presencia de formas de lechos o vegetación.
- La estimación de los tamaños de grano locales a partir del esfuerzo cortante crítico es una aproximación de las interdependencias complejas del movimiento de sedimentos incipientes y de las propiedades de la mezcla de tamaño de grano, las propiedades sedimentológicas a pequeña escala o la morfología local.

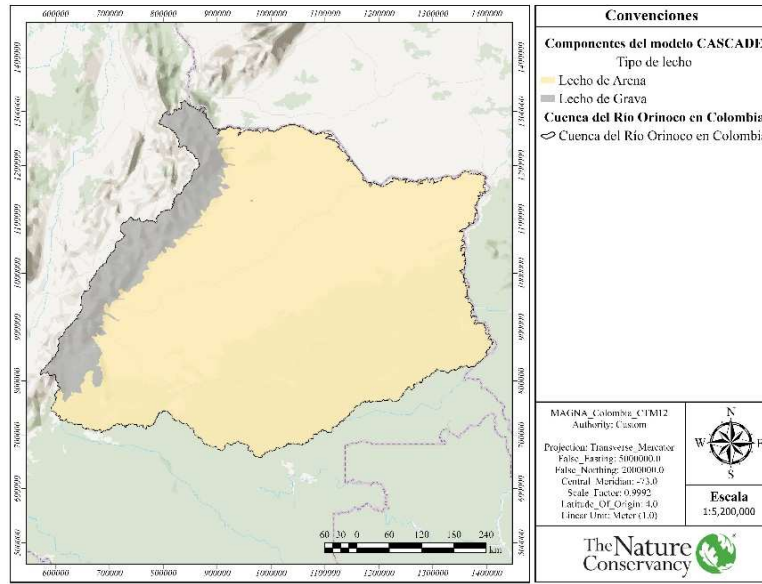
Partiendo de esta idea, se plantea un enfoque acoplado para la interpolación del valor del D_{50} , abordando las ecuaciones de los parámetros hidráulicos presentadas por Parker et al. (2007) y Wilkerson & Parker (2011). Dado que la aproximación de Parker et al. (2007) solo es válida para cauces con lecho de gravas y la de Wilkerson & Parker (2011) solo aplica para cauces con lecho de arena, es necesario clasificar los tramos de la red fluvial asumiendo que los cauces con lecho de grava se encuentran limitados por transporte (pendiente ≤ 0.025 m/m) y los de arena por suministro (pendiente > 0.025 m/m), esto, utilizando el criterio propuesto por Flores et al. (2006), tal como se muestra en la **Figura 131**. Si bien el material del lecho de un cauce natural tiene un rango de diferentes tamaños de partícula, se asume como criterio práctico que aquellos cauces que están limitados por suministro presentan lecho de grava y en contraposición, aquellos limitados por capacidad presentan lecho de arena.

Figura 131. Criterio de clasificación propuesto por Flores et al. (2006).



La distribución espacial de los tipos de lecho limitados por suministro y por transporte en la VRO se presenta en la **Figura 132**. El resultado obtenido es coherente con los valores de pendiente presentados en la **Figura 125** dado que el tamaño límite de gravas que considera Parker et al. (2007) es de 25 mm.

Figura 132. Zonas de la VRO consideradas con lechos de área y grava



Para el caso de los ríos con lecho de arena, se introdujo un factor de ajuste específico (F_S) para la VRO en la ecuación de la pendiente. Para esto, se extrajeron los datos de pendiente a través del modelo de elevación digital, junto con datos granulométricos -específicamente para el valor del D_{50} - obtenidos de Johnsson, Stallard, & Lundberg (1991), presentados en la **Tabla 40**. Con estos datos se construyó la función Q_{bf} vs F_S , que permite ajustar las estimaciones de D_{50} obtenidas con las ecuaciones de Parker et al. (2007) (**Figura 133**). Las ecuaciones utilizadas se presentan a continuación.

Tabla 39. Ecuaciones asociadas a parámetros hidráulicos de banca llena para ríos de grava y arena

Lecho de grava	Lecho de arena
$B_{bf} = \frac{4.63}{g^{1/5}} Q_{bf}^{0.4} \left(\frac{Q_{bf}}{D_{50} D_{50} \sqrt{g D_{50}}} \right)^{0.0667}$	$B_{bf} = 0.0038 \left(\frac{\sqrt{R}}{v} \right)^{0.494} g^{-0.0875} Q_{bf}^{0.669} D_{50}^{0.0685}$
$H_{bf} = \frac{0.382}{g^{1/5}} Q_{bf}^{2/5}$	$H_{bf} = 22.9 \left(\frac{\sqrt{R}}{v} \right)^{-0.310} g^{-0.293} Q_{bf}^{0.276} D_{50}^{-0.155}$
$U_{bf} = 3.71 \left(\frac{H_{bf}}{D_{50}} \right)^{0.263} \sqrt{g H_{bf} S}$	$S = F_S * 19.1 \left(\frac{Q_{bf}}{D_{50} D_{50} \sqrt{g D_{50}}} \right)^{-0.394} R^{-0.196}$
	$U_{bf} = \frac{1}{n} H_{bf}^{2/3} S^{1/2}$

Parker et al. (2007) y Wilkerson & Parker (2011).

Tabla 40 Valores de D50 medidos para diferentes UHA en la VRO

UHA	Muestra	S(m/m)	A (km²)	Q	D50 (mm)
1716	OR88C-S1	0.091122	403.592375	150.0	0.12500
2692	OR88C-S2	0.013986	1035.275332	304.0	0.08839
2466	OR88C-S3	0.015421	233.201952	99.4	0.50000
2466	OR88C-S4	0.015421	233.201952	99.4	0.25000
2423	OR88C-S5	0.045266	293.260545	118.1	0.17678
2270	OR88C-S6	0.018385	153.092381	72.5	0.17678
2180	OR88C-S7	0.072546	2848.293579	649.0	0.08839
2117	OR88C-S8	0.014738	274.187246	112.3	0.25000
2036	OR88C-S9	0.012871	533.323396	184.9	0.06250
2074	OR88C-S10	0.015528	119.859903	60.4	2.82843
2081	OR88C-S11	0.032734	904.695274	274.7	0.17678
2042	OR88C-S12	0.136619	1439.493763	389.1	0.06250
1848	OR88C-S13	0.107116	295.027227	118.6	0.35355
2347	OR85-S27	0.019612	1075.128577	312.7	0.23102
2290	OR85-S31	0.009077	83741.575611	8183.8	0.20436
1680	OR85-S56	0.481419	139289.9721	11983.92	0.187913
1618	OR85-S75	0.917306	116135.1505	10457.15	0.138378
1607	OR85-S77	0.752392	53984.21426	5888.757	0.246068
1283	OR86B-S3	0.655078	44873.9027	5126.855	0.194916
1338	OR86B-S6	0.492038	31306.22169	3914.184	0.377164
1378	OR86B-S9	0.475142	13465.38487	2079.595	0.204999
1406	OR86B-S12	0.829307	12350.92839	1949.191	0.204768
1100	OR86B-S15	0.481924	9147.055851	1556.299	0.140644
1590	OR86B-S29	0.1186	63963.24556	6687.164	0.264617
1636	OR86B-S31	0.1679	5666.093255	1086.871	0.20034
1619	OR86B-S34	0.497883	53872.09134	5879.587	0.195985
1275	OR86B-S37	0.502803	44584.66001	5102.064	0.275966
1354	OR86B-S42	0.556471	28182.02577	3617.559	0.237079

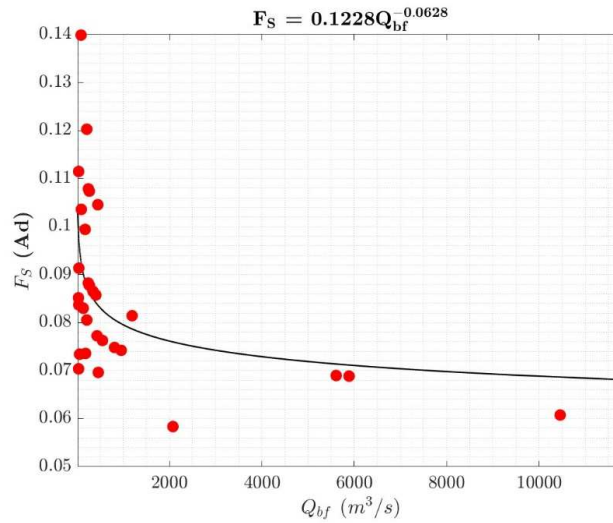
Fuente: Datos tomados de Johnsson, Stallard, & Lundberg (1991),

Donde Q_{bf} es el caudal de banca llena (m^3/s); g la aceleración de la gravedad (m/s^2); D_{50} el tamaño medio del material del lecho (m); H_{bf} la profundidad del caudal de banca llena (m); B_{bf} ancho del canal de banca llena (m); U_{bf} la velocidad del caudal de banca llena (m/s); S la pendiente (m/m); ρ la densidad del fluido; ρ_s la densidad del sedimento; ν la viscosidad cinemática del fluido y R el número de Reynolds de la partícula:

$$R = \frac{\sqrt{\Delta g D_{50} D_{50}}}{\nu}$$

Con Δ , siendo la gravedad específica de la partícula.

Figura 133. Función del factor de corrección de la pendiente F_s para ríos con lecho de arena



Para los ríos con lecho de grava se resuelve de manera acoplada las ecuaciones propuestas por Parker et al. (2007) de la siguiente manera:

- Se calcula de forma directa la profundidad H_{bf} (ver **Tabla 39**), dado que esta solo depende del caudal de banca llena Q_{bf} .
- Se introduce el valor de H_{bf} de la ecuación de la velocidad de banca llena U_{bf} . Para este caso, la pendiente S es la obtenida mediante el modelo de elevación digital lo cual, la hace una variable conocida. Lo anterior permite que U_{bf} solamente dependa de D_{50} .
- Se resuelven de forma acoplada U_{bf} y B_{bf} . Con ello se tiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas.
- La solución del sistema anterior se obtiene minimizando como función objetivo FO , el error entre una velocidad “real” V_r otra “aparente” V_a , planteadas de la forma:

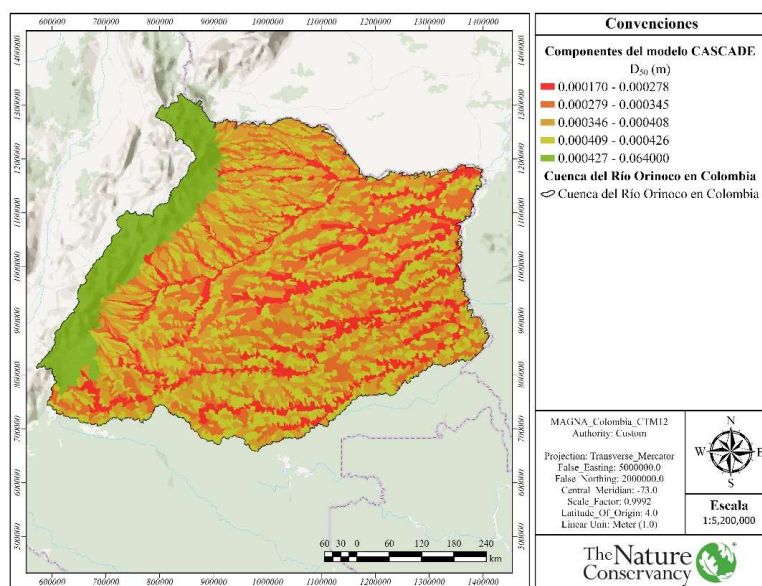
$$FO = \min |V_r - V_a|$$

Con

$$V_a = \frac{Q_{bf}}{H_{bf} B_{bf}}; \quad V_r = 3.71 \left(\frac{H_{bf}}{D_{50}} \right)^{0.263} \sqrt{g H_{bf} S}$$

A continuación, se presentan los D_{50} estimados en la VRO. En general, el resultado obtenido es coherente con los datos muestreados, en donde el tamaño de grano se reduce sobre los tramos aguas abajo de la cuenca.

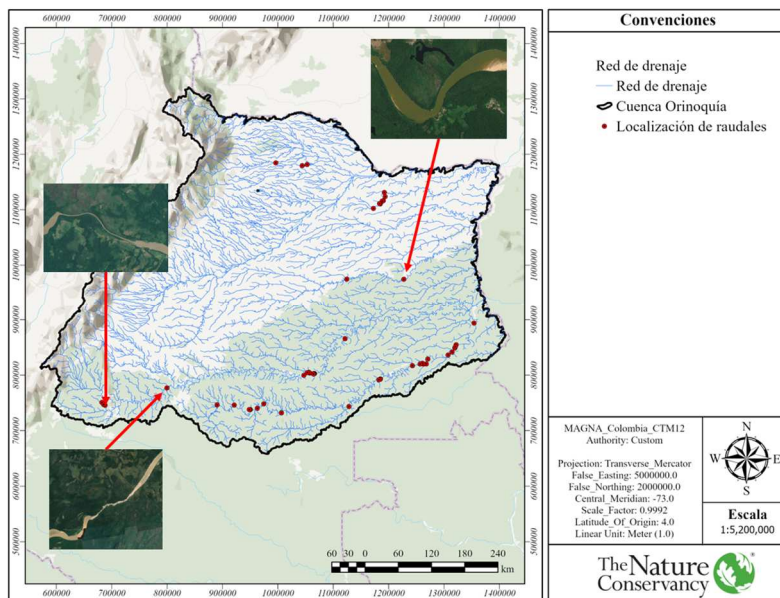
Figura 134. Distribución espacial de D_{50} estimados en la VRO.



9.2.1.3 Parámetros hidráulicos (ancho, profundidad y velocidad)

Partiendo de los Q_{bf} y D_{50} estimados, se estimaron los parámetros hidráulicos de ancho, profundidad y velocidad en ríos, utilizando las ecuaciones de Parker et al. (2007) y Wilkerson & Parker (2011) presentadas en la **Tabla 39**. Previo al cálculo de los parámetros hidráulicos en cada tramo de red fluvial, se efectuaron correcciones a los anchos del cauce por presencia de raudales y de controles geológicos. Para esto, se presentan los sitios de raudales reportados en la cartografía base nacional generada por IGAC (2022) y localizada a partir de análisis de imágenes satelitales de Google Earth correspondientes a los años 2023. En la **Figura 135** se presentan los tramos de red identificados con raudales y de controles geológicos.

Figura 135. Raudales y de controles geológicos presentes en la VRO



De la misma forma la **Figura 136** muestra el tamaño medio de sedimento (D_{50}), ancho de banca llena (B_{bf}) y profundidad del agua (H_{bf}) para cada los tramos analizados, en función del caudal de banca llena. Cabe resaltar que el valor de D_{50} para los ríos de grava se acerca sobre los 64 mm, dado que el algoritmo de solución está restringido a dicho valor como límite escogido, con el ánimo de diferenciar las gravas de los guijarros. De la misma forma, las **Figura 137** a la **Figura 139** muestran los valores de los parámetros hidráulicos para toda la VRO, en cuanto a profundidad, velocidad y ancho del cauce.

Figura 136. Tamaño medio de sedimento (D_{50}), ancho de banca llena (B_{bf}) y profundidad del agua (H_{bf})

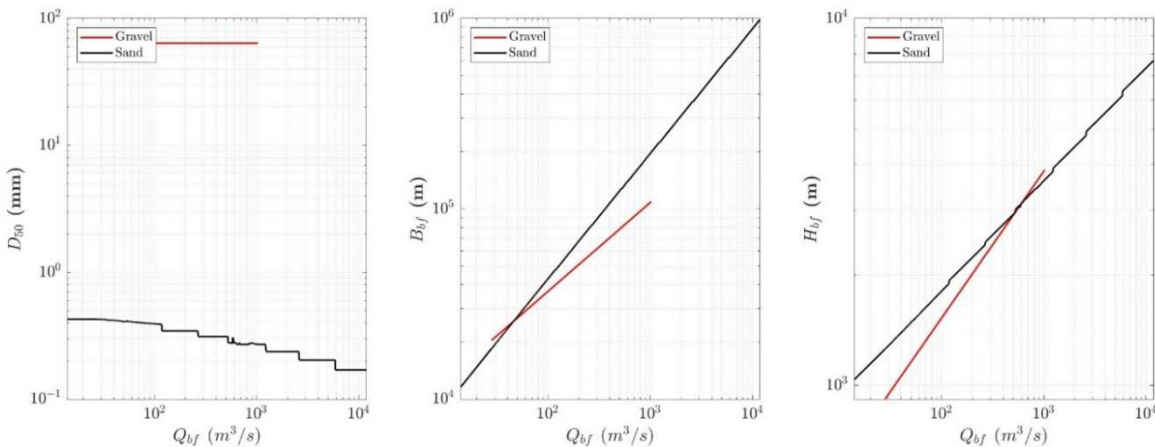


Figura 137. Ancho de banca llena en la VRO

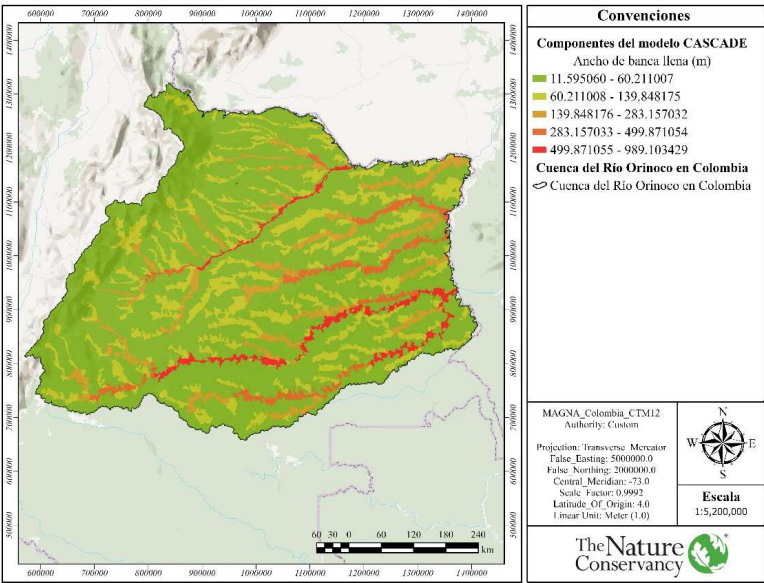


Figura 138. Velocidad de banca llena en la VRO

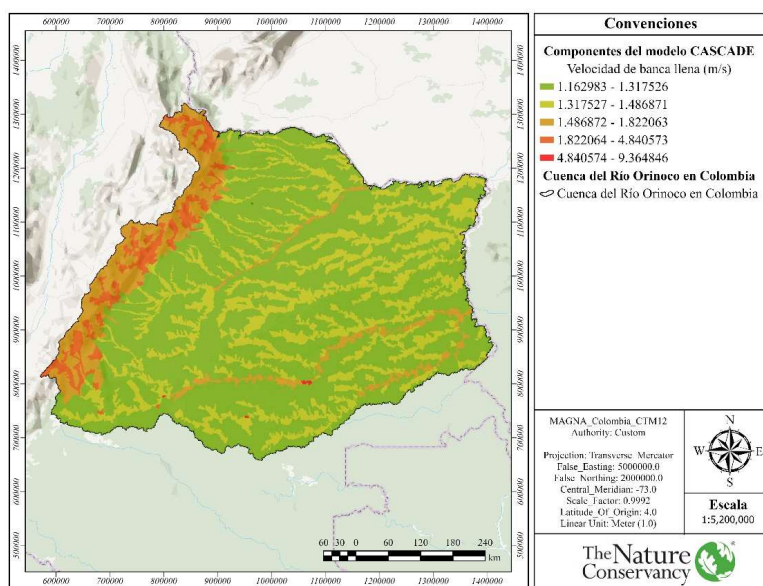
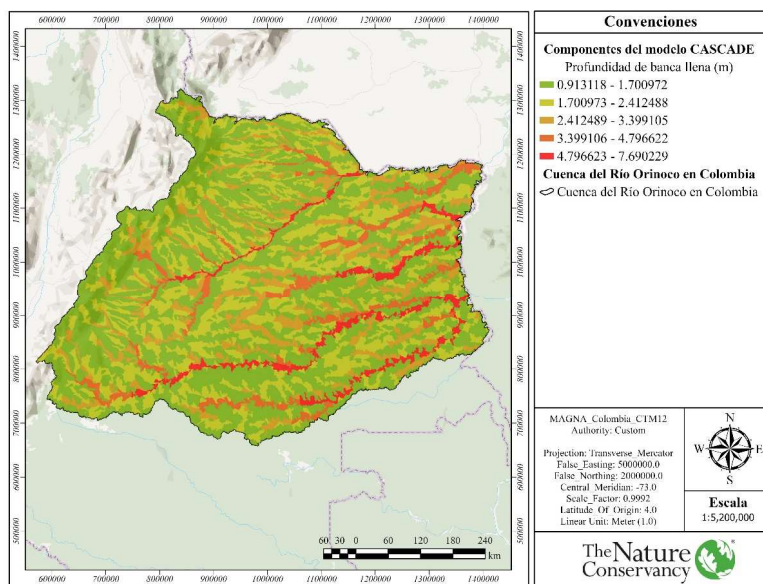


Figura 139. Profundidad de banca llena en la VRO



9.2.1.4 Exportación de sedimentos de la cuenca.

Con el propósito de estimar la carga de sedimentos en suspensión, se inició de manera preliminar con el cálculo de la cantidad de pérdida anual de suelo [kt.km⁻². año⁻¹]. Para ello, se hace uso de la Ecuación Universal de Perdidas de Suelo (RUSLE) (Renard et al., 1996). para cada unidad de análisis i , y la cual se expresa como:

$$rusle_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i \cdot P_i$$

Donde $rusle_i$ es la cantidad de pérdida anual [$kn.km^2. año^{-1}$]; R_i la erosividad de la lluvia [$(M).mm)/(ha*hr)$], K_i la erodabilidad del suelo [$(t.ha.hr)/(M).ha.mm)$]; LS_i el factor topográfico [adim.]; C_i el factor de cobertura del suelo [adim.] y P_i el factor de prácticas de manejo de este [adim.].

Ahora bien, la cuantificación de la exportación de sedimentos E de cada unidad i que realmente llega a la red de drenaje se calcula como:

$$E_i = SDR_i * usle_i$$

Donde el SDR_i corresponde al coeficiente de aporte de sedimentos (factor adimensional entre 0 y 1). El anterior, representa la depositación de partículas debido a la reducción de la capacidad de transporte de sedimentos de la escorrentía superficial a lo largo de una ladera o subcuenca. En este caso, el anterior se calcula como (Kumar Sampath & Radhakrishnan, 2023):

$$SDR_i = 0.42A^{-0.125}$$

Ahora bien, con el ánimo de encontrar la exportación de sedimentos, se realiza la explicación de cada uno de los parámetros que conforman la ecuación RUSLE en los apartados posteriores.

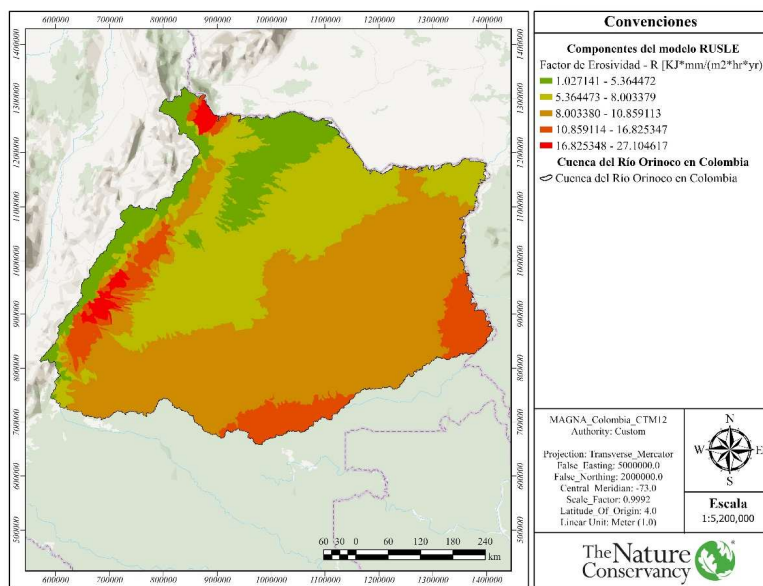
9.2.1.5 Erosividad de la lluvia (R)

Para estimar este parámetro, se hace uso de la relación entre el factor R [$KJ.mm/m^2.h$] y los valores de precipitación media multianual P ($mm/año$) propuesta por Pérez Arango & Mesa (2002) para todo el territorio colombiano:

$$R = 1.19254 \times 10^{-5} P^{1.7014}$$

La distribución espacial del factor de erosividad de la lluvia para la VRO se presenta en la **Figura 140**.

Figura 140. Erosividad de la lluvia para la VRO

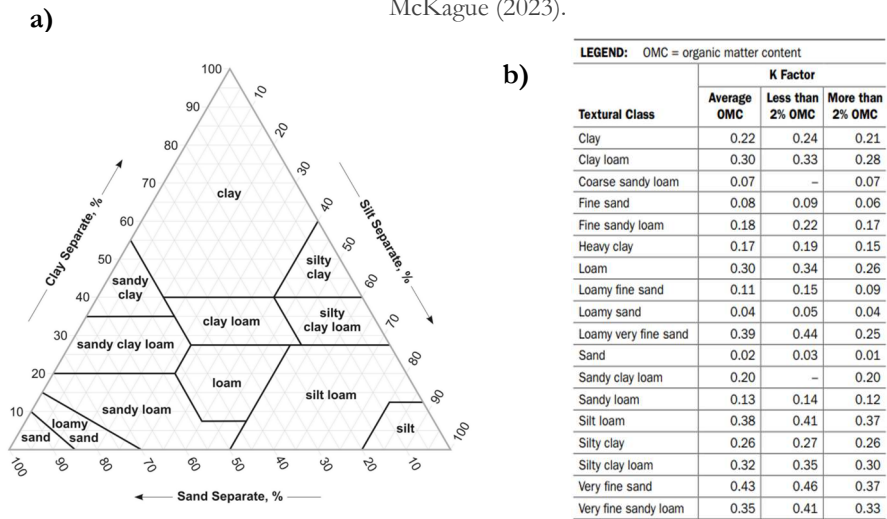


9.2.1.6 Erodabilidad del suelo (K)

Para estimar este parámetro se utilizó el diagrama de clase textural propuesto por FAO (2006), el cual fue programado en MATLAB. El anterior, requiere la cantidad de materia orgánica, limo, arcilla y arena contenida en la capa de suelo. Se utilizaron los datos de distribución textural del Sistema de información

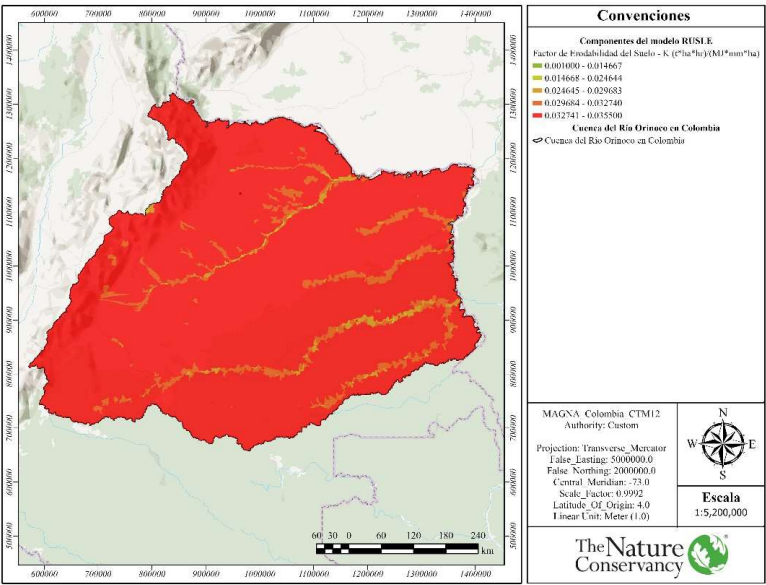
mundial de suelo ISRIC. Esta base de datos proporciona los contenidos de arenas, limos y arcilla de todo el mundo. Los mapas texturales se construyeron a partir de más de 100.000 perfiles de suelo levantados en todo el mundo y haciendo uso de diferentes covariables entre las cuales está la precipitación generada por WorldClim (Hengl et al., 2017). A través de los archivos ráster asociados a la cantidad de material por kg de suelo, se determina la clase textural a través del diagrama planteado por FAO (2006) ilustrado en la **Figura 141a**. Dado que no se cuentan con datos medidos de este parámetro, el coeficiente *K*, se obtiene de los resultados reportados por McKague (2023).

Figura 141. a) Diagrama de clase textural tomados de FAO (2006), b) Valores del parámetro K obtenidos por McKague (2023).



En consecuencia, la distribución espacial del factor de erodabilidad del suelo para la VRO se presenta en la **Figura 142**.

Figura 142. Erodabilidad del suelo (t.ha.hr)/ (MJ.ha.mm)



9.2.1.7 Factor de cobertura vegetal (C) y de prácticas (P)

Los valores del factor de cobertura vegetal fueron obtenidos de la literatura, basándose en la información proporcionada por Tosic et al. (2011); Rozos et al. (2013); Panagos et al. (2015); Pacheco et al. (2019). En la **Tabla 41**, se presentan los valores ajustados de C para cada tipo de cobertura. Cabe resaltar que, dado el tamaño de la VRO para Colombia, se decidió considerar únicamente el nivel 2 de las coberturas Corine Land Cover

Tabla 41. Factor de cobertura vegetal (C) para las categorías de la cobertura nacional a escala 1:100.000 Corine Land Cover nivel 2.

Código	Descripción	C
11	Zonas Urbanizadas	0.001
12	Zonas Industriales	0.001
13	Zonas de extracción minera	1
14	Zonas verdes artificiales, no agrícolas	0.001
21	Cultivos transitorios	0.25
22	Cultivos permanentes	0.25
23	Pastos	0.01
24	Áreas agrícolas heterogéneas	0.25
31	Bosques	0.00339
32	Áreas con vegetación herbácea/arbustiva	0.01
33	Áreas abiertas sin o con poca vegetación	1
41	Áreas húmedas continentales	0.001
51	Áreas continentales	0.001

Con ello, se asigna un valor C único para cada UHA, a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{j=1}^n C_j A_j}{\sum_{j=1}^n A_j}$$

Donde C_j indica el valor del coeficiente C para la cobertura i (ver **Tabla 41**), y A_j es el área asociada a cada cobertura dentro de la UHA. Es decir, se calcula el valor del parámetro C a través de un promedio ponderado.

9.2.2 Esquema de calibración del modelo RUSLE

El esquema de calibración usa como datos observados, los valores de exportación de sedimentos [kt/año] expuestos en IDEAM (2019). Los anteriores, se asocian a las UHA donde se realizó la medición. Seguidamente, se plantea un parámetro de ajuste α aplicado al parámetro C de cobertura, que permita ajustar los resultados de la RUSLE simulados junto con los datos observados. Por ende, la ecuación RUSLE, ajustada para el proceso de calibración, queda expresada como:

$$rusle_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot (\alpha C_i) \cdot P_i$$

Se realizaron 5000 simulaciones, definiendo un valor aleatorio para el parámetro $\alpha \in [1.8, 2.5]$. Inicialmente, el procedimiento consiste en simular el valor de exportación de sedimentos para cada una de las UHA, acumulando los resultados a través de la red topológica hasta la zona de descarga –que en este caso alude al área acumulada hasta la UHA donde se tienen los datos observados– para luego realizar la minimización de la función objetivo, escogida como el RMSE:

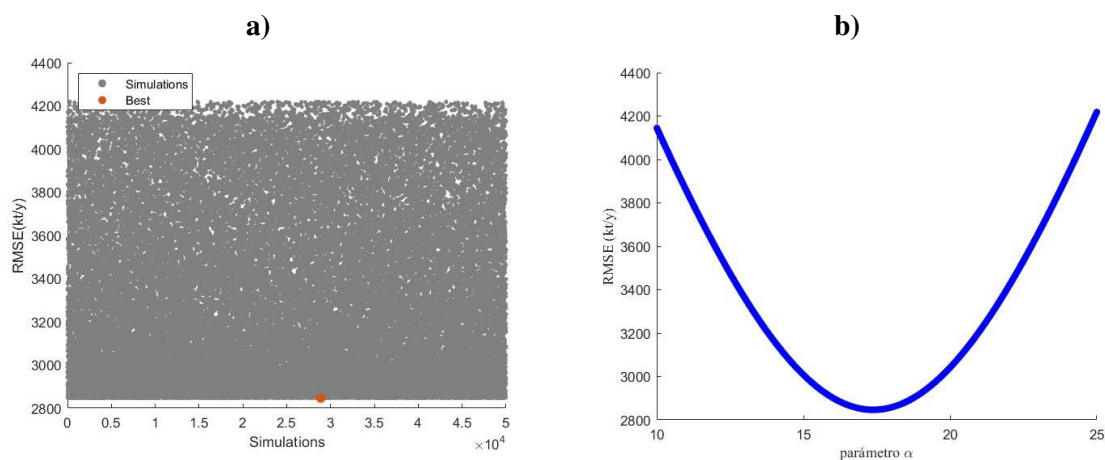
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_0^t - x_m^t)^2}$$

Dónde

x_0^t Valor observado
 x_m^t Valor simulado
 n Numero de datos

Este proceso se repite para cada uno de los 5000 valores aleatorios de α . La **Figura 143a** muestra el número de simulaciones realizado junto con el valor de α que encuentra el valor mínimo de RMSE (en rojo). Asimismo, la **Figura 143b** muestra el comportamiento de la función objetivo en respecto del parámetro de calibración, donde se observa claramente un mínimo global.

Figura 143. a) Simulaciones de la ecuación RUSLE para múltiples valores de α . b) comportamiento de la función objetivo



La **Figura 144** muestra los resultados simulados vs los valores de exportación de sedimentos observados. Se observa que el error medio oscila las 3000 kt/año, lo cual se considera aceptable para el nivel de detalle de la información base requerida para el cálculo. Por otro lado, La **Figura 144** muestra la exportación promedio anual multianual de sedimentos determinada por medio de la aplicación de la RUSLE calibrada en el proceso anterior. Se observa que los mayores valores se encuentran sobre la parte alta de la cuenca, relacionada con la zona de asociada a la Cordillera de los Andes. De la misma forma, se observan valores altos de exportación de sedimentos en lugares cercanos a los centros poblados, zonas de minería, etc. Esto, debido a que el valor del coeficiente C de la RUSLE es cercano a uno en estos lugares.

Figura 144. Valores simulados vs. observados de exportación de sedimentos

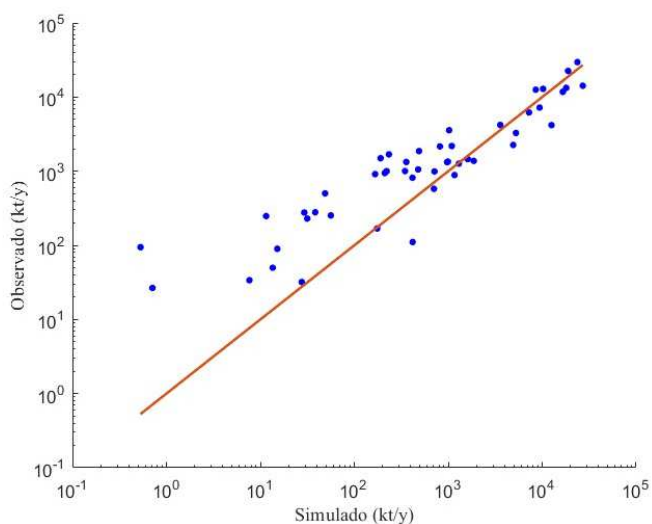
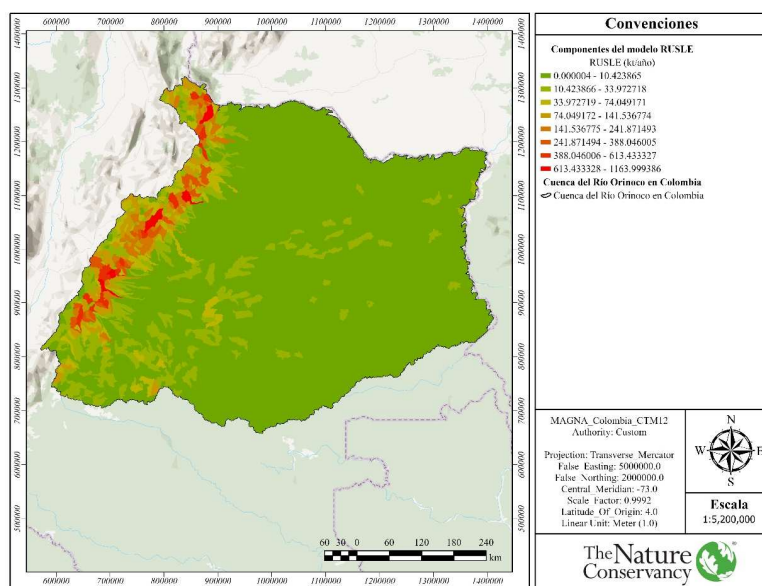


Figura 145. Exportación promedio anual multianual de sedimentos en la VRO



9.2.3 Indicadores de atributo

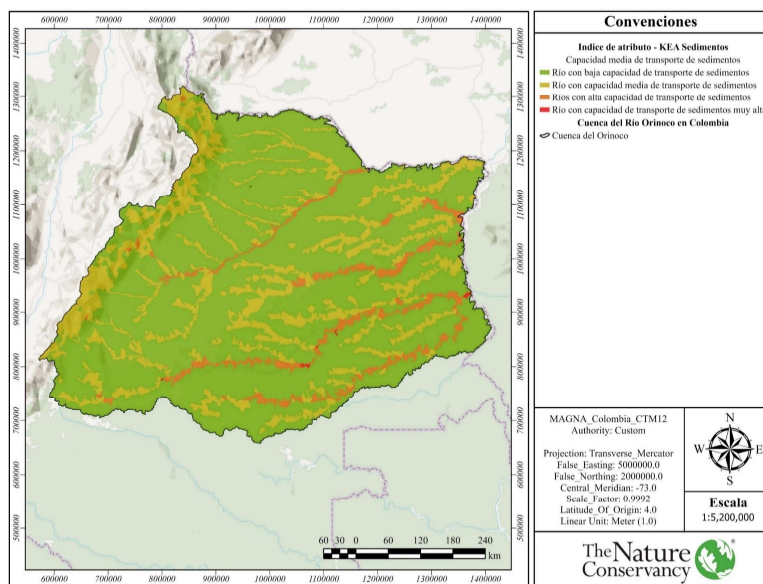
La estimación de los indicadores de atributo mencionados se llevó a cabo utilizando los resultados de capacidad de transporte de sedimentos simuladas con CASCADE para la condición histórica. Considerando que los indicadores de atributo tienen como objetivo principal la identificación de los diferentes grupos de agua dulce presentes en la VRO, se procedió a categorizar el indicador, como se detalla en la **Tabla 42**.

Tabla 42. Clasificación de la capacidad del transporte de sedimentos.

Nombre	Índice de atributo	Rango (t/año)	Descripción
Capacidad media de transporte de sedimentos, en el estado de banca llena	1	<1.00E+09	Río con baja capacidad de transporte de sedimentos
	2	1.00E+09–1.00E+10	Río con capacidad media de transporte de sedimentos
	3	1.00E+10–1.00E+11	Alta capacidad de transporte de sedimentos del río
	4	>1.00E+11	Río con capacidad de transporte de sedimentos muy alta

La distribución espacial de cada indicador categorizado se visualiza en la **Figura 146**. Como se observa, la mayor parte de los ríos de la VRO presenta una capacidad de transporte media, lo cual es coherente con la topografía del terreno caracterizada por bajas pendientes. Sin embargo, dentro de esta cuenca, existen diversas condiciones geológicas que generan algunos raudales, donde la capacidad de transporte de sedimentos es mayor de lo que podría esperarse en un terreno predominantemente plano.

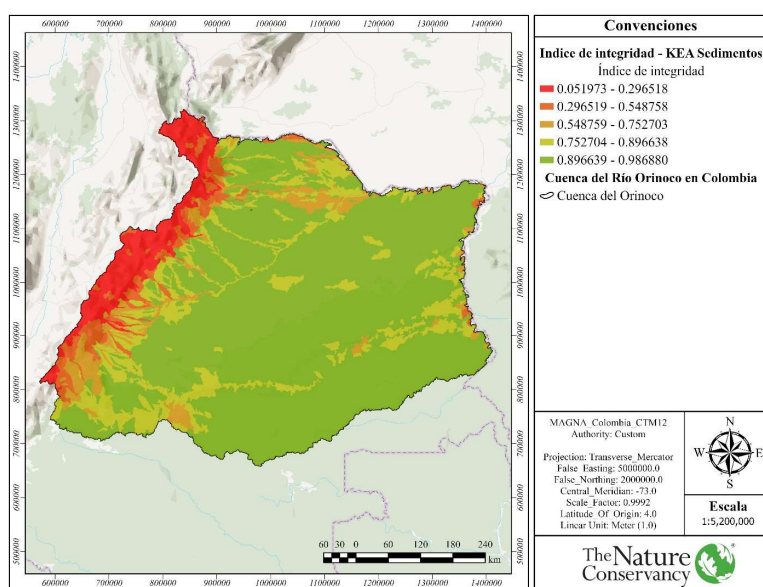
Figura 146. Capacidad de transporte de sedimentos en la VRO



9.2.4 Indicadores de integridad

A partir de los percentiles que fueron extraídos cada 5% para el indicador de integridad del régimen hidrológico, tanto en la condición histórica como en la condición de cambio climático ensamblada, se llevó a cabo la ejecución del modelo CASCADE. Vale la pena señalar que todos los parámetros dependientes del caudal fueron actualizados en cada ejecución. Con los resultados obtenidos se generaron las curvas de duración de sedimentos en intervalos del 5%, y posteriormente se procedió al cálculo del indicador de integridad (ver **Figura 147**).

Figura 147. Integridad - KEA flujo de sedimentos en la VRO



En líneas generales, se observa que la integridad de los sedimentos podría sufrir alteraciones significativas, especialmente en la zona baja de la cuenca. Según el indicador seleccionado, se anticipa que el régimen

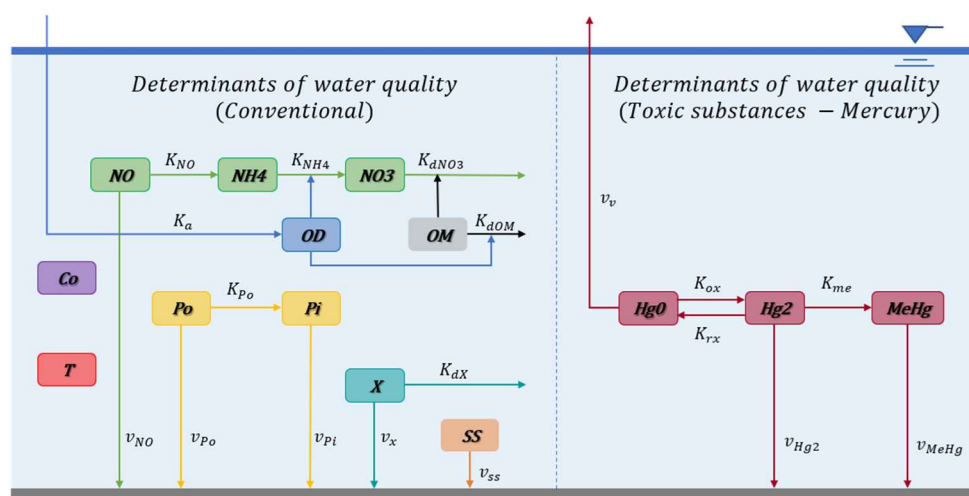
de sedimentos podría experimentar variaciones superiores al 80% en algunas áreas. Esta situación daría lugar a un impacto relevante en la distribución y tamaño de las barras de sedimentos que se encuentran en los cauces fluviales. Es importante señalar que este fenómeno podría agravarse debido a las presiones antropogénicas, especialmente la deforestación y la ganadería predominantes en esta región, lo que podría acarrear consecuencias adversas para los ecosistemas de agua dulce.

9.3 KEA – Calidad del agua

La calidad del agua representa un atributo ecológico clave, ya que ejerce una influencia fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos de agua dulce. Además, tiene un impacto directo en la provisión de servicios ecosistémicos, la biodiversidad y los usos de las comunidades humanas que dependen de estos entornos. La dinámica inherente a la calidad del agua en los ecosistemas de agua dulce está intrínsecamente ligada a factores como la geología subyacente, la composición atmosférica, el patrón climático predominante y los usos del suelo. Modificaciones en cualquiera de estos factores pueden conllevar a un cambio en la composición química del agua, lo que a su vez puede desencadenar procesos de eutrofización (Klimaszyk and Goldyn, 2020). Dicho proceso puede ser impulsado por el aumento de ciertos elementos químicos, a raíz de modificaciones en los condicionantes previamente mencionados. La deforestación, la expansión agrícola y pecuaria, el crecimiento poblacional, el desarrollo industrial, la minería ilegal y la producción de hidrocarburos son algunas de las amenazas a las cuales se ven expuestos los ecosistemas de agua dulce (Castello et al., 2013; Higgins et al., 2021; N. LeRoy Poff et al., 1997; Zeiringer et al., 2018), de aquí la importancia de conocer su comportamiento.

En el caso de la VRO, la caracterización de la calidad del agua se realizó a partir del concepto de factor de asimilación propuesto por Chapra (2008). Para esto, se utilizó el modelo de calidad del agua en estado estacionario (MCAES) descrito por Nogales et al. (2023) (ver **Figura 148**).

Figura 148. Esquema conceptual de los procesos involucrados en la modelación de los determinantes de la calidad del agua en la VRO.



Fuente: Nogales et al. (2023)

Este modelo incorpora 14 determinantes de calidad del agua (DCA). Entre estos se incluyen:

- Temperatura (T)
- Conductividad (Co)
- Nitrógeno Orgánico (NO)

- Nitrógeno Amoniacal (NH_4)
- Nitratos (NO_3)
- Fósforo Orgánico (PO)
- Fósforo Inorgánico (PI)
- Materia Orgánica (DBOC de Reacción Rápida) (MO)
- Oxígeno Disuelto (OD)
- Sólidos Suspendidos (SS)
- Organismos Patógenos (X)
- Mercurio Elemental (Hg)
- Mercurio Divalente (Hg_2)
- Metil Mercurio ($MeHg$)

Conceptualmente el factor de asimilación puede entenderse como la capacidad de la corriente en asimilar un evento de contaminación. De acuerdo con Chapra (2008), este concepto está relacionado con los efectos físicos, químicos y biológicos que actúan sobre la sustancia contaminante en la corriente receptora.

Los ríos o corrientes de agua pueden asimilar carga contaminante a partir de tres mecanismos: dilución, transporte y decaimiento. A continuación, se conceptualizan estos 3 elementos de manera teórica:

- **Dilución:** Se asocia a la magnitud del caudal del cuerpo receptor. Un río con un caudal alto y con baja carga contaminante aguas arriba de un vertimiento, tendrá la capacidad de diluir la concentración de contaminante proveniente de una afluencia, para generar una menor concentración aguas abajo de ésta.
- **Transporte:** El transporte del contaminante estará definido por dos mecanismos básicos, advección diferencial y difusión turbulenta, que en conjunto generan el fenómeno de dispersión longitudinal.
- **Decaimiento:** Está relacionado con procesos físicos (e.g. sedimentación), químicos (e.g. hidrólisis) y biológicos (e.g. oxidación, nitrificación y muerte) que dependerán tanto de la especie contaminante como de las características del cuerpo receptor.

A partir de estos tres mecanismos, se define el concepto de factor de asimilación (Chapra, 2008).

$$a = \frac{W}{C}$$

Donde a es el factor de asimilación (dependiente de las características del cuerpo receptor y de la especie contaminante), W es la carga contaminante aguas arriba del tramo y C es la concentración aguas abajo.

Los factores de asimilación pueden calcularse considerando las ecuaciones del modelo de calidad del agua ADZ-QUASAR (Lees et al., 1998).

$$0 = \frac{1}{\bar{t} - \tau} [C_u e^{-k\tau} - C] - kC$$

Donde $\bar{t}$ es el tiempo medio de viaje, C_u es la concentración aguas arriba del tramo y τ es el tiempo de retraso advectivo. El modelo de Zona Muerta Agregada (ADZ – Aggregated Dead Zone) (Beer and Young, 1983) considera el almacenamiento en zonas muertas como la principal causa de dispersión. El efecto agregado de varias zonas muertas en un tramo dado de un río se considera equivalente al de una

zona muerta individual, con un volumen definido y un tiempo de residencia agregado asociado. La advección se modela mediante un coeficiente de retraso asociado a un canal lineal.

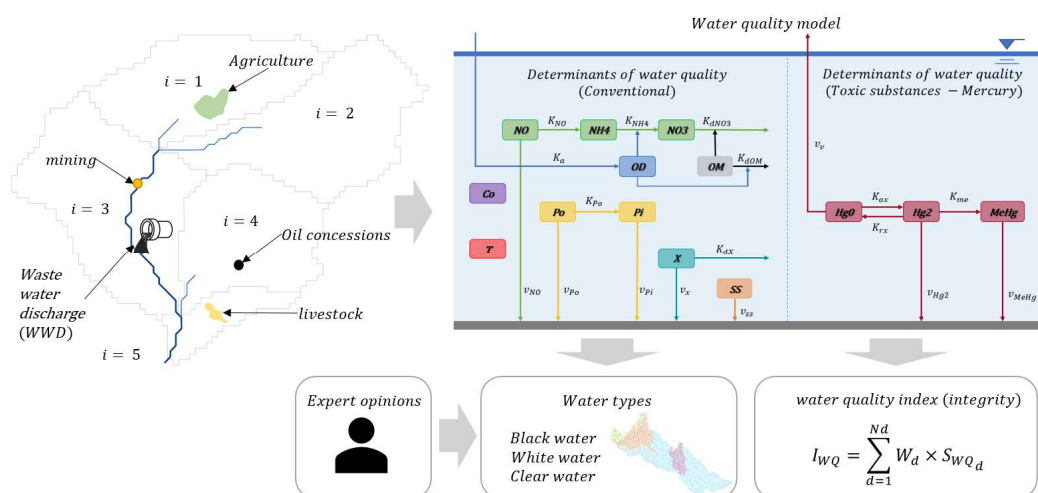
Incorporando el término de decaimiento para un determinante no conservativo, se obtiene la formulación general del modelo como:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{1}{\bar{t} - \tau} [C_u(t - \tau)e^{-k\tau} - C(t)] - kC$$

En Colombia, el concepto de factor de asimilación ha sido aplicado ampliamente a múltiples escalas, como lo dejan ver las investigaciones desarrolladas por Correa-Caselles (2022); Mamani (2022); Navas (2016) y Rojas (2011). Estos ejercicios deducen los factores de asimilación a partir de las ecuaciones del ADZ-QUASAR. El uso de este concepto ha sido tan extendido que la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) incorporándolo en el documento de Metodología para la Definición de la Longitud de Influencia de Vertimientos sobre Corrientes de Agua Superficial.

La síntesis de las ecuaciones para cada DCA se presenta en la **Tabla 43**, mientras que la síntesis del esquema metodológico abordado se presenta en la **Figura 149**.

Figura 149. Representación esquemática del cálculo de los dos grupos de índices de calidad del agua



La información utilizada para la caracterización del KEA de Calidad del Agua, así como los modelos y herramientas de análisis pueden ser consultadas en el **Anexo 3**.

Tabla 43. Formulación matemática de factores de asimilación para los determinantes de calidad del agua

Determinantes	Reacciones consideradas	Ecuación - ADZ-QUASAR	Factor de asimilación
Temperatura (T)	Conservativo	$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{TR} [T_u(t - \tau) - T(t)]$	$a_T = Q$
Conductividad (Co)	Conservativo	$\frac{dCo}{dt} = \frac{1}{TR} [Co_u(t - \tau) - Co(t)]$	$a_{Co} = Q$
Sólidos Suspendidos (SST)	Sedimentación	$k_{ss} = \frac{v_{ss}}{H}$ $\frac{dSS}{dt} = \frac{1}{TR} \left((SS_{(t-\tau,u)} * e^{-\tau * k_{ss}}) - SS_{(t)} \right) - \underbrace{k_{ss} * SS}_{Sedimentation}$	$a_{ss} = Q * \left(\frac{(\bar{t} * DF * k_{ss}) + 1}{e^{-\bar{t} * (1-DF) * k_{ss}}} \right)$ $SS = \frac{W_{ss(u)}}{a_{ss}}$
Organismos Patógenos (X)	Decaimiento Sedimentación	$k_X = k_{dX} + F_{px} * \frac{v_X}{H}$ $\frac{dX}{dt} \text{ Frequency} = \frac{1}{TR} \left((X_{(t-\tau,u)} * e^{-\tau * k_X}) - X_{(t)} \right) - \overbrace{\frac{k_{dX} * X}{\text{Decay (mortality)}} - \frac{F_{px} * \frac{v_X}{H} * X}{\text{Sedimentation}}}^{-k_X * X}$	$a_X = Q * \left(\frac{(\bar{t} * DF * k_X) + 1}{e^{-\bar{t} * (1-DF) * k_X}} \right)$ $X = \frac{W_{X(u)}}{a_{sst}}$
Nitrógeno Orgánico (NO)	Hidrólisis Sedimentación	$k_{N1} = k_{HNO} + \frac{v_{NO}}{H}$ $\frac{dNO}{dt} = \frac{1}{TR} \left((NO_{(t-\tau,u)} * e^{-\tau * k_{N1}}) - NO_{(t)} \right) - \overbrace{\frac{k_{HNO} * NO}{\text{Hydrolysis}} - \frac{\frac{v_{NO}}{H} * NO}{\text{Sedimentation}}}^{k_{N1} * NO}$	$a_{NO} = Q * \left(\frac{(\bar{t} * DF * k_{N1}) + 1}{e^{-\bar{t} * (1-DF) * k_{N1}}} \right)$
Nitrógeno Amoniacal (NH4)	Hidrólisis Nitrificación	$k_{N2} = k_{HNO} * \frac{NO}{NH4_{(u)}} - k_{NH4}$ $\frac{dNH4}{dt} = \frac{1}{TR} \left((NH4_{(t-\tau,u)} * e^{\tau * k_{N2}}) - NH4_{(t)} \right) + \underbrace{\frac{k_{HNO} * NO}{\text{Hydrolysis}}} - \underbrace{\frac{k_{NH4} * NH4}{\text{Nitrification}}}$	$a_{NH4} = Q * \left(\frac{(k_{NH4} * \bar{t} * DF) + 1}{e^{\bar{t} * (1-DF) * k_{N2}} + (\bar{t} * DF * (k_{N2} + k_{NH4}))} \right)$
Nitratos (NO3)	Nitrificación Desnitrificación	$k_{NO3} = F_{oxdNO3} * k_{dNO3}$ $k_{N3} = k_{NH4} * \frac{NH4}{NO3_{(u)}} - k_{NO3}$ $\frac{dNO3}{dt} = \frac{1}{TR} \left((NO3_{(t-\tau,u)} * e^{\tau * k_{N3}}) - NO3_{(t)} \right) + \underbrace{\frac{k_{NH4} * NH4}{\text{Nitrification}}} - \underbrace{\frac{k_{NO3} * NO3}{\text{Desnitrification}}}$	$a_{NO3} = Q * \left(\frac{(\bar{t} * DF * k_{NO3}) + 1}{e^{\bar{t} * (1-DF) * k_{N3}} + (\bar{t} * DF * (k_{N3} + k_{NO3}))} \right)$
Fósforo Orgánico (Po)	Hidrólisis Sedimentación	$\frac{dPo}{dt} = \frac{1}{TR} \left((Po_{(t-\tau,u)} * e^{-\tau * k_{Po1}}) - Po_{(t)} \right) - \overbrace{\frac{k_{HPo} Po}{\text{Hydrolysis}} - \frac{\frac{v_{Po}}{H} Po}{\text{Sedimentation}}}^{-k_{Po1} * Po}$	$a_{Po} = Q * \left(\frac{(\bar{t} * DF * k_{Po1}) + 1}{e^{-\bar{t} * (1-DF) * k_{Po1}}} \right)$

Determinantes	Reacciones consideradas	Ecuación - ADZ-QUASAR	Factor de asimilación
Fósforo Inorgánico (Pi)	Hidrólisis Sedimentación	$k_{Pi} = \frac{v_{Pi}}{H}$ $k_{Pi2} = k_{HPo} * \frac{Po}{Pi_{(u)}} - k_{Pi}$ $\frac{dPi}{dt} = \frac{1}{TR} \left((Pi_{(t-\tau,u)} e^{\tau * k_{Pi2}}) - Pi_{(t)} \right) + \underbrace{\frac{k_{HPo} * Po}{Hydrolysis}} - \underbrace{\frac{k_{Pi} * Pi}{Sedimentation}}$	$a_{Pi} = Q * \left(\frac{(\bar{t} * DF * k_{Pi}) + 1}{e^{\bar{t} * (1-DF) * k_{Pi2}} + (\bar{t} * DF * (k_{Pi2} + k_{Pi}))} \right)$
Materia Orgánica (MO)	Oxidación Nitrificación	$\sigma_{OM} = F_{oxDOM} * k_{dOM}$ $\theta_{OM} = 0.00286 * (1 - F_{oxdNO3}) * k_{dNO3}$ $k_{OM2} = -\theta_{OM} * \frac{NO3}{OM_{(u)}} - \sigma_{OM}$ $\frac{dOM}{dt} = \frac{1}{TR} \left((OM_{(t-\tau,u)} * e^{\tau * k_{OM2}}) - OM_{(t)} \right) - \underbrace{\theta_{OM} * NO3}_{Nitrification} - \underbrace{\sigma_{MO} * OM}_{Oxidation}$	$a_{OM} = Q * \left(\frac{(\bar{t} * DF * \sigma_{OM}) + 1}{e^{\bar{t} * (1-DF) * k_{OM2}} + (\bar{t} * DF * (k_{OM2} + \sigma_{OM}))} \right)$
Déficit de Oxígeno (D)	Oxidación Nitrificación Reaireación	$O = O_s - D$ $k_o = \left(k_{dOM} * \frac{OM}{O_{(u)}} \right) + \left(4.57 * k_{NH4} * \frac{NH4}{O_{(u)}} \right) - k_a$ $\frac{dD}{dt} = \frac{1}{TR} \left((D_{(t-\tau,u)} * e^{\tau * k_o}) - D_{(t)} \right) + \underbrace{\frac{k_{dOM} * OM}{Oxidation}} + \underbrace{\frac{4.57 * k_{NH4} * NH4}{Nitrification}} - \underbrace{\frac{k_a * D_{(t)}}{Reaeration}}$	$a_D = D_{(u)} * Q \left(\frac{((\bar{t} * DF * k_a) + 1) + \bar{t} * DF * (k_a - k_o)}{D_{(u)} * e^{\bar{t} * (1-DF) * k_o} + \bar{t} * DF * O_s * (k_a - k_o)} \right)$
Mercurio Elemental (Hg0)	Reducción Volatilización Oxidación	$K_1 = F_d * \frac{v_v}{H} + k_{ox}$ $K_2 = k_{rx} * \frac{Hg2}{Hg0_{(u)}} - K_1$ $\frac{dHg0}{dt} = \frac{1}{TR} * (Hg0_{(t-\tau,u)} * e^{\tau * K_{dHg0}} - Hg0_{(t)}) + \underbrace{k_{rx} * Hg2}_{Reduction} - \underbrace{F_d * \frac{v_v}{H} * Hg0}_{Volatilization} - \underbrace{k_{ox} * Hg0}_{Oxidation}$	$a_{Hg0} = Q * \left(\frac{(\bar{t} * DF * K_{Hg0}) + 1}{e^{\bar{t} * (1-DF) * K_{dHg0}} + (\bar{t} * DF * (K_{dHg0} + K_{Hg0}))} \right)$
Mercurio Divalente (Hg2)	Oxidación Reducción Sedimentación Metilización	$K_{Hg2} = F_{pHg2} * \frac{v_{Hg2}}{H} + k_{rx} + k_{me}$ $k_{me} = F_{pHg2} * k_{me,a} + (1 - F_{pHg2}) * k_{me,d}$	$a_{Hg2} = Q * \left(\frac{(\bar{t} * DF * K_{Hg2}) + 1}{e^{\bar{t} * (1-DF) * K_{dHg2}} + (\bar{t} * DF * (K_{dHg2} + K_{Hg2}))} \right)$

Determinantes	Reacciones consideradas	Ecuación - ADZ-QUASAR	Factor de asimilación
		$K_{dHg2} = k_{ox} * \frac{Hg_o}{Hg2_{(u)}} - K_{Hg2}$ $\frac{dHg2}{dt} = \frac{1}{TR} * \left((Hg2_{(t-\tau,u)} * e^{\tau * K_{dHg2}}) - Hg2_{(t)} \right) + \underbrace{k_{ox} * Hg_o}_{Oxidation} - \underbrace{F_p * \frac{v_{Hg2}}{H} * Hg2}_{Sedimentation} - \underbrace{k_{rx} * Hg2}_{Reduction} - \underbrace{k_{me} * Hg2}_{Methylation}$	
Metilmercurio (CH3Hg)	Metilización Sedimentación Bioacumulación	$K_{MeHg} = F_{pMeHg} * \frac{v_{MeHg}}{H}$ $K_{dMeHg} = k_{me} * \frac{Hg2}{MeHg_{(u)}} - K_{MeHg}$ $\frac{dMeHg}{dt} = \frac{1}{TR} * \left((MeHg_{(t-\tau,u)} * e^{\tau * K_{dMeHg}}) - MeHg_{(t)} \right) + \underbrace{k_{me} * Hg2}_{Methylation} - \underbrace{F_p * \frac{v_{s,2}}{H} MeHg}_{Sedimentation}$	$a_{MeHg} = Q * \left(\frac{(K_{MeHg} * \bar{t} * DF) + 1}{e^{\bar{t} * (1-DF) * K_{dMeHg}} + ((K_{dMeHg} + K_{MeHg}) * \bar{t} * DF)} \right)$

Fuente: Nogales et al. (2023)

<i>u</i>	denota la concentración aguas arriba del determinante aguas arriba
<i>T</i>	Temperatura (°C)
<i>Co</i>	Conductividad (µS/cm)
<i>SS</i>	Concentración de sólidos en suspensión (mg/l)
<i>X</i>	Concentración de organismos patógenos (NMP/l)
<i>NO</i>	Concentración de nitrógeno orgánico (mg/l)
<i>NH4</i>	Concentración de nitrógeno amoniacal (mg/l)
<i>NO3</i>	Concentración de nitratos (mg/l)
<i>Po</i>	Concentración de fósforo orgánico (mg/l)
<i>Pi</i>	Concentración de fósforo inorgánico (mg/l)
<i>OM</i>	Concentración de materia orgánica (mg/l)
<i>O</i>	Concentración de oxígeno disuelto (mg/l)
<i>DO</i>	Concentración de déficit de oxígeno (mg/l)
<i>Os</i>	Concentración de oxígeno de saturación (mg/l)
<i>Hg0</i>	Concentración de mercurio elemental (mg/l)
<i>Hg2</i>	Concentración de mercurio divalente (mg/l)
<i>CH3Hg</i>	Concentración de metilmercurio (mg/l)
<i>Q</i>	Caudal del río (m3/s)
<i>H</i>	Profundidad del río (m)
<i>U</i>	Velocidad del agua en el río (m/s)
<i>TR</i>	Tiempo de residencia (día)
<i>TR</i>	Tiempo de advección (día)
<i>τ</i>	Tiempo medio de recorrido (día)
<i>DF</i>	Fracción dispersiva (Adimensional)
<i>S</i>	Pendiente del río (m/m)

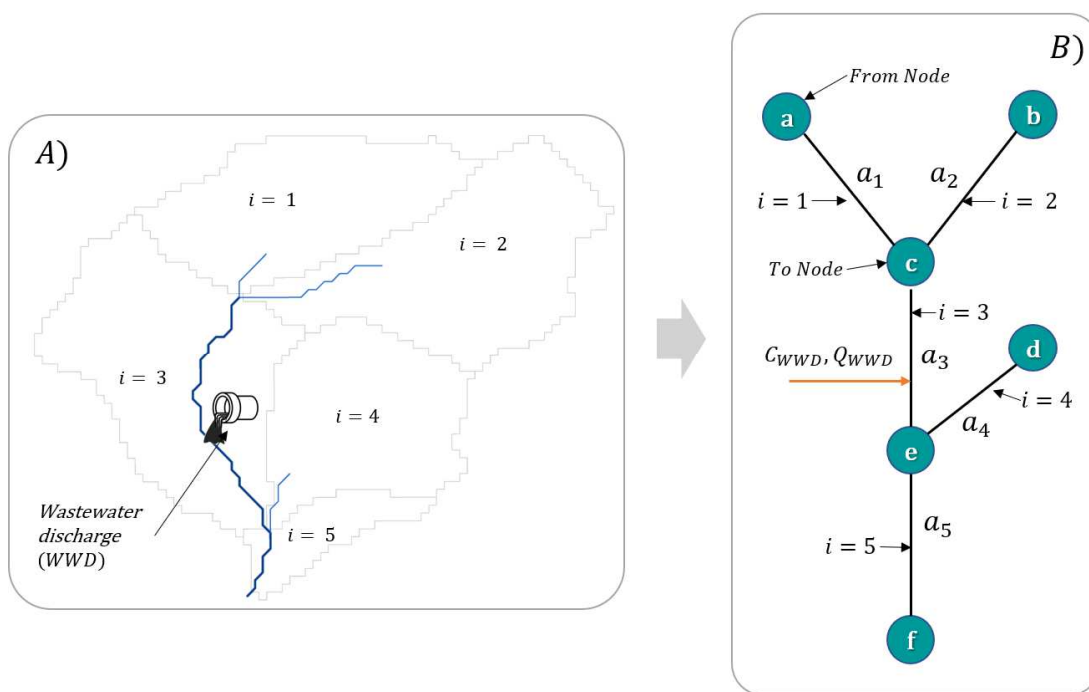
<i>L</i>	Longitud del río (m)
<i>v_{SS}</i>	Tasa de sedimentación (m/día)
<i>k_{dX}</i>	Descomposición constante de organismos patógenos - mortalidad (Adimensional)
<i>F_{px}</i>	Fracción de organismos patógenos adsorbidos en partículas sólidas (Adimensional)
<i>v_X</i>	Velocidad de sedimentación de la fracción adsorbida de patógenos en partículas sólidas (m/día)
<i>k_{HNO}</i>	Tasa de descomposición por hidrólisis del nitrógeno orgánico (1/día)
<i>v_{NO}</i>	Velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico (m/día)
<i>k_{NH4}</i>	Tasa de decaimiento por nitrificación (1/día)
<i>k_{dNO3}</i>	Tasa de desnitrificación (1/día)
<i>F_{oxdNO3}</i>	Factor que tiene en cuenta el efecto de la falta de oxígeno en la desnitrificación (Adimensional)
<i>k_{HPO}</i>	Tasa de decaimiento por hidrólisis de fósforo orgánico (1/día)
<i>v_{PO}</i>	Velocidad de sedimentación del fósforo orgánico (1/día)
<i>v_{pi}</i>	Velocidad de sedimentación de fósforo inorgánico (m/día)
<i>k_{dom}</i>	Tasa de descomposición por oxidación de la materia orgánica (1/día)
<i>F_{oxdom}</i>	Factor que considera el efecto del oxígeno bajo en la materia orgánica (Adimensional)
<i>k_a</i>	Tasa de reacción (1/día)
<i>v_v</i>	Velocidad de volatilización del mercurio elemental (m/día)
<i>k_{ox}</i>	Tasa de reacción de oxidación del mercurio elemental (1/día)

<i>k_{rx}</i>	Tasa de decaimiento por oxidación del mercurio (1/día)
<i>k_{me,a}</i>	Tasa de metilación del mercurio divalente adsorbido (1/día)
<i>k_{me,d}</i>	Tasa de metilación del mercurio divalente disuelto (1/día)
<i>F_{pHg2}</i>	Fracción de mercurio divalente adsorbido en partículas sólidas (Adimensional)
<i>v_{Hg2}</i>	Velocidad de sedimentación del mercurio divalente (m/día)
<i>F_{pMeHg}</i>	Fracción de metilmercurio adsorbido en partículas sólidas (Adimensional)
<i>v_{MeHg}</i>	Velocidad de sedimentación del metilmercurio (m/día)

La implementación computacional de los factores de asimilación presentados en la **Tabla 43**, se llevó a cabo en Matlab, utilizando una programación orientada a objetos. El modelo se diseñó para operar a nivel de red topológica bajo un esquema de acumulación recursiva, y para asimilar entradas de cargas puntuales y difusas de los diferentes determinantes de calidad del agua.

Para la implementación, las microcuencas se transformaron en un esquema de grafos. En este esquema, cada microcuenca está representada por dos nodos y un arco, como se muestra en la **Figura 150**. Este enfoque permite determinar las conexiones entre microcuencas y facilita el cálculo acumulativo de variables aguas abajo, lo que es crucial para la modelación de la calidad del agua.

Figura 150. Representación de microcuencas en un esquema gráfico



Fuente: Nogales et al. (2023)

Para ilustrar el funcionamiento del modelo, se considera la microcuenca de cabecera $i = 1$ con un nodo inicial (a) y un nodo final (c) (**Figura 150**). La concentración de un determinante de la calidad del agua j (Donde; $j = T, Co, SS, N, NH_4, NO_3, P, OM, O_2, X, Hg_0, Hg_2, CH_3Hg$) vendría dada por el cociente del producto de la concentración en el nodo a ($C_{a1,j}$), el caudal de la microcuenca Q_1 , y el factor de asimilación $a_{1,j}$:

$$C_{1,j} = \frac{C_{a1,j} Q_1}{a_{1,j}}$$

En el caso de una microcuenca intermedia $i = 3$, donde se produce la confluencia de las microcuencas 1 y 2, y además existe un vertido con una concentración $C_{WWD,j}$ y un caudal Q_{WWD} ; la concentración en esta microcuenca para el determinante de calidad del agua j vendría dada por:

$$C_{3,j} = \frac{C_{1,j}Q_1 + C_{2,j}Q_2 + C_{WWDj}Q_{WWD}}{a_{3,j}}$$

Siguiendo esta misma lógica, las ecuaciones generales para estimar la concentración de un determinante de la calidad del agua j en las cuencas intermedias y de cabecera vienen dadas por:

$$if \begin{cases} \text{Microcuencas} \\ \text{cabecera} \end{cases} C_{i,j} = \frac{1}{a_{i,j}} \left[C_{n_{i,j}} Q_i + \sum_{k=1}^K Q_{WWD_{k,i}} C_{WWD_{k,i,j}} \right]$$

$$if \begin{cases} \text{Microcuencas} \\ \text{intermedias} \end{cases} C_{i,j} = \frac{1}{a_{i,j}} \left[\sum_{l=1}^I C_{l,j} Q_l + \sum_{k=1}^K Q_{WWD_{k,i}} C_{WWD_{k,i,j}} \right]$$

Donde:

i	Microcuencas
j	Determinantes de calidad del gua
k	Vertimiento
I	Número de microcuencas aguas arriba de la microcuenca i
K	Número de vertimientos del determinante j en la microcuenca i
Q_i	Caudal de la microcuenca i
$a_{i,j}$	Factor de asimilación de la microcuenca i del determinante j
$C_{i,j}$	Concentración de la microcuenca i del determinante j
$C_{n_{i,j}}$	Concentración en el nodo de origen de la microcuenca i del determinante j
$C_{WWD_{k,i,j}}$	Concentración del vertimiento en la microcuenca i del determinante j
$Q_{WWD_{k,i}}$	Caudal del vertimiento k en la microcuenca i

9.3.1 Configuración del modelo MCAES

La configuración de MCAES se realizó en cuatro pasos: 1) asignación de características físicas del río, 2) definición de fuentes de contaminación, 3) asignación de cargas presuntivas por DCA a cada fuente de contaminación y 4) parametrización de los procesos químicos. A continuación, se detallan cada uno de estos.

9.3.2 Características físicas del río

En la **Tabla 44** se detallan las características físicas que utiliza MCAES en los tramos de río correspondientes a cada unidad de análisis. Así mismo, se describe la forma en la cual se configuró cada parámetro.

Tabla 44. Características físicas de los tramos de río

Determinantes de calidad del agua	Parámetro	Unidad	Descripción de configuración
Caudal del río	Q	m ³ /s	Se utilizó el caudal medio anual multianual estimado con las series simuladas a partir del modelo MoHiTo.
Profundidad del río	H	m	Se utilizó los valores estimados para Cascade mediante las ecuaciones de Wilkerson & Parker (2011) (lechos de arena) y Parker et al. (2007) (lechos de grava)
Velocidad del agua en el río	U	m/s	
Tiempo de residencia	TR	día	S utilizo la siguiente ecuación: $TR = \bar{t} * DF$
Tiempo de advección	τ	día	S utilizo la siguiente ecuación: $\tau = \bar{t} * (1 - DF)$
Tiempo medio de recorrido	$\bar{t}$	día	S utilizo la siguiente ecuación: $U_s = \frac{U}{1 + \beta}$ $\bar{t} = \left(\frac{L}{U_s}\right) * \left(\frac{1}{3600 * 24}\right)$ Donde U_s es la velocidad del soluto (m/s); β es el coeficiente de retardo efectivo. De acuerdo con González (2008), para Colombia, el coeficiente de retardo efectivo para ríos de montaña tiene una magnitud global de 1.10 mientras que para ríos de llanura es de 2.
Fracción dispersiva	DF	Adimensional	De acuerdo con González (2008), para Colombia, la fracción dispersiva para ríos de montaña tiene una magnitud global de 0.27 mientras que para ríos de llanura es de 0.40
Pendiente del río	S	m/m	Se estimó a partir del modelo digital de elevación del terreno
Longitud del río	L	m	Se estimó a partir del modelo digital de elevación del terreno

Fuente: Nogales et al. (2023)

Nótese que los parámetros $\bar{t}$ y DF presentan una diferenciación entre ríos de planicie y ríos de montaña. Para caso de la VRO, esta segmentación se realizó a partir de la clasificación propuesta por Flores et al. (2006), basado en los trabajos realizados por Correa-Caselles (2022); Mamani (2022); Navas (2016) y Rojas (2011) para Colombia.

9.3.3 Fuentes de contaminación

En total se consideraron cinco fuentes de contaminación, las cuales fueron asociadas a los diferentes sectores productivos que tienen lugar en la cuenca. A continuación, se describe la información que fue utilizada para la cuantificación de las cargas en cada fuente de contaminación y el método de distribución espacial considerado.

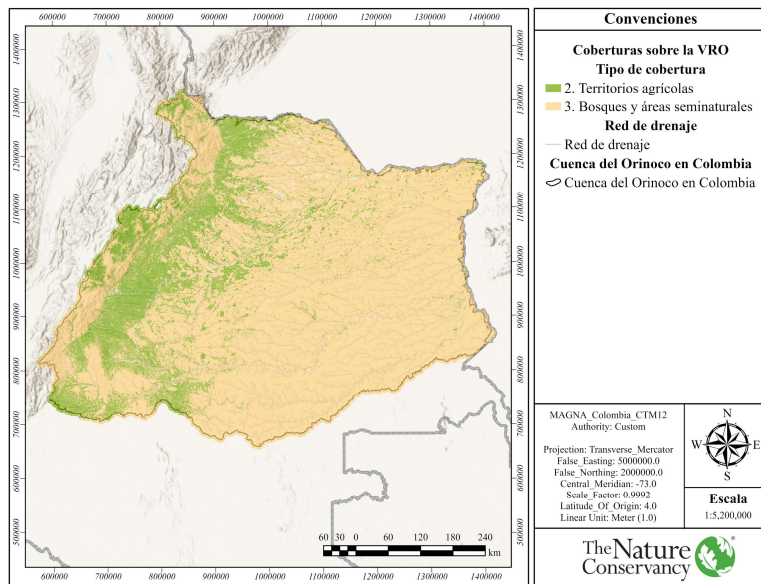
9.3.3.1 Sector agrícola

La fuente de contaminación en este sector se asoció a la agricultura. Se utilizó la información de áreas de cultivos y pastos consolidada en la capa de coberturas nacionales bajo la codificación Corine Land Cover escala 1:100,000 del año 2018 (ver Tabla 45). Dado que esta información se encuentra espacialmente explícita, a partir de una estadística zonal se asignó el área con presencia de cultivos que posee cada unidad de análisis en la VRO (ver **Figura 151**).

Tabla 45. Coberturas de pastos y cultivos

Código	Nombre cobertura	Área (km2)	Código	Nombre cobertura	Área (km2)
11	Zonas Urbanizadas	271.7732	222	Cultivos permanentes arbustivos	8.629378
12	Zonas Industriales	55.93824	2223	Cacao	0.416946
13	Zonas de extracción minera	59.90388	223	Cultivos permanentes arbóreos	6.054462
14	Zonas verdes artificiales, no agrícolas	16.83376	2231	Otros cultivos permanentes arbóreos	2.833702
211	Otros cultivos transitorios	349.2286	2232	Palma de aceite	2896.838
212	Cereales	539.172	224	Cultivos agroforestales	0.333167
2121	Arroz	1534.183	51	Áreas continentales	4316.328
2122	Maíz	62.95766	41	Áreas húmedas continentales	1976.439
2134	Soya	132.1004	33	Áreas abiertas sin o con poca vegetación	2250.548
2134	Soya	101.032	32	Áreas con vegetación herbácea/arbustiva	117557.5
2141	Cebolla	14.45781	31	Bosques	153819.3
2151	Papa	9.287719	24	Áreas agrícolas heterogéneas	17453.98
221	Cultivos permanentes herbáceos	20.63621	23	Pastos	38965.68
2211	Otros cultivos permanentes herbáceos	76.54794	2242	Cultivos y árboles plantados	0.3671
2212	Caña	62.82991	2241	Pastos y árboles plantados	1.306287

Figura 151. Área de cultivos y pastos en la cuenca de la VRO



9.3.3.2 Sector pecuario

La ganadería, cerdos y aves de engorde se asociaron como la fuente de contaminación de este sector. En este caso, se consideró la información de los censos agropecuarios a nivel municipal generada por ICA (2023), al igual que se hizo en el módulo de demandas del modelo hidrológico (ver numeral 9.1.4.3).

9.3.3.3 Sector doméstico

La población de los principales centros poblados de la VRO se consideró como la fuente de contaminación. Los datos utilizados fueron los mismo que en el módulo de demandas del modelo hidrológico (ver numeral 9.1.4.3).

9.3.3.4 Sector de hidrocarburos

Las concesiones de pozos petroleros fueron las consideradas como fuentes de contaminación para este sector. Los datos utilizados fueron los mismos que en el módulo de demandas del modelo hidrológico (ver numeral 9.1.4.3).

9.3.3.5 Sector minero

El mercurio generado a partir de la minería de oro regulada y no regulada se tomó como la fuente de contaminación para este sector. De acuerdo con Díaz et al. (2020), más del 80% del oro que se produce en Colombia proviene de minería no regulada (o ilegal). Por otra parte, UPME (2017), realizó una investigación en aspectos claves sobre la trazabilidad en la comercialización del oro en Colombia, analizando las variables técnicas y económicas de los actores involucrados en la comercialización del metal a nivel nacional e internacional, y encontró que más del 70% del oro que se comercializa en Colombia proviene de la pequeña minería (barequeros y chatarreros). De acuerdo con esto, se consideró que la producción de oro reportada por la UPME (2022b), se divide en 20% regulada y 80% no regulada. Con base en la cartografía proveniente del IGAC asociada a economías ilegales en Colombia, la principal ubicación de las economías basadas en minería de oro ilegal se dan en el departamento del Guainía, específicamente sobre el río homónimo. Por ende, la **Tabla 46** indica la producción de oro para el año 2022 sobre el río. La anterior, se distribuye de forma proporcional sobre el río Guaviare, como se puede observar en la **Figura 152**. La cantidad de gramos de oro para cada UHA - g_{uha} - se calcula como:

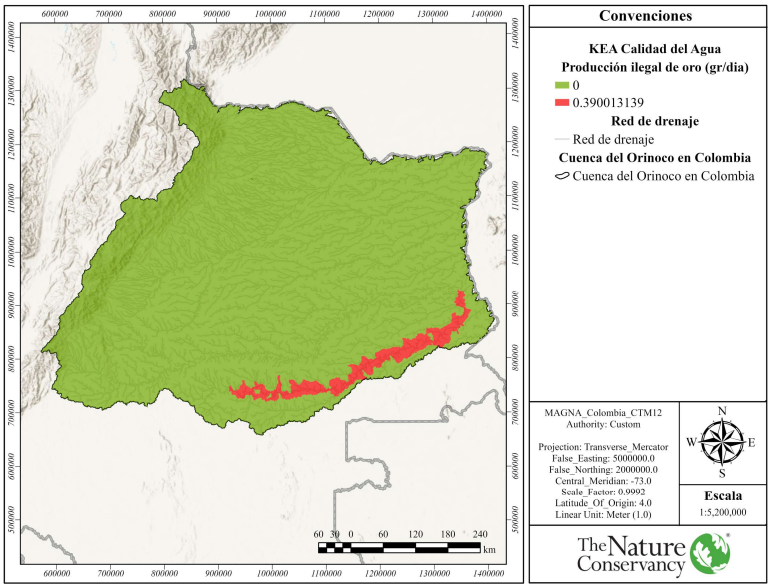
$$g_{uha} = \frac{G_{oro}}{365(N_{uha})}$$

Tabla 46. Producción de oro en la VRO

Producción de Oro				
Departamento	Municipio	Producción 2022 (gr)	Minería legal	Minería ilegal
Guainía	Inírida	33,097.49	6619.498	26477.992

Donde G_{oro} es la cantidad total de gramos asociados a minería ilegal (26477.99), y N_{uha} alude al número de UHAs sobre las cuales se desea hacer la distribución. Las anteriores, se ubicaron netamente sobre aquellas que son aferentes al río Guaviare.

Figura 152. Distribución espacial de la producción ilegal de oro en la VRO



9.3.4 Cargas presuntivas

9.3.4.1 Sector agrícola

Se parte del supuesto de que las áreas de cobertura que contienen cultivos y pastos experimentan procesos de fertilización a lo largo del año. Según lo establecido por BSFP (2018), los valores considerados de carga anual de nitrógeno debida a la fertilización son los siguientes: 142.4 kg/ha/año para cultivos, 56.6 kg/ha/año para pastos y 95 kg/ha/año para zonas de mosaicos. En el caso de las áreas destinadas a cultivos, se ha considerado que el fertilizante es de tipo inorgánico y que se proporciona en un 50% de nitrato (NO₃) y un 50% de amonio (NH₄). Por otro lado, para las zonas con pastizales, se tomaron en cuenta la fertilización orgánica a través de porcinoza, conformada en un 40% de nitrógeno orgánico (NO), un 30% de nitrato (NO₃) y un 30% de amonio (NH₄), de acuerdo con las pautas establecidas por la Sociedad de Agricultores de Colombia (2002). En el caso del fósforo, se tomó en cuenta los datos de carga anual proporcionados por Pérez-Vélez (2014), que ascienden a 63.3 kg/ha/año. Esta cantidad se divide en un 70% de fósforo inorgánico (PI) y un 30% de fósforo orgánico (PO), en línea con investigaciones de Wade et al. (2007); Whitehead et al. (2011) y Jackson-Blake et al. (2016). Los cálculos realizados para las cargas presuntivas y los valores obtenidos y asignados se presentan en la **Tabla 47** y **Tabla 48**.

Tabla 47. Cálculo de cargas presuntivas por cobertura de la tierra

Cobertura	Código	PO (kg.d-1.m-2)	PI (kg.d-1.m-2)	N (kg.d-1.m-2)	NH ₄ (kg.d-1.m-2)	NO ₃ (kg.d-1.m-2)
Otros cultivos transitorios	211	$0.3 \times \frac{40}{10000}$	$0.3 \times \frac{40}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Cereales	212	$0.3 \times \frac{80}{10000}$	$0.3 \times \frac{80}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Arroz	2121	$0.3 \times \frac{11}{10000}$	$0.3 \times \frac{11}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Maíz	2122	$0.3 \times \frac{50}{10000}$	$0.3 \times \frac{50}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Sorgo	2123	$0.3 \times \frac{80}{10000}$	$0.3 \times \frac{80}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Soya	2134	$0.3 \times \frac{65}{10000}$	$0.3 \times \frac{65}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Cebolla	2141	$0.3 \times \frac{200}{10000}$	$0.3 \times \frac{200}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Papa	2151	$0.3 \times \frac{70}{10000}$	$0.3 \times \frac{70}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Cultivos permanentes herbáceos	221	$0.3 \times \frac{40}{10000}$	$0.3 \times \frac{40}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Otros cultivos permanentes herbáceos	2211	$0.3 \times \frac{40}{10000}$	$0.3 \times \frac{40}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Caña	2212	$0.3 \times \frac{100}{10000}$	$0.3 \times \frac{100}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Cultivos permanentes arbustivos	222	$0.3 \times \frac{10}{10000}$	$0.3 \times \frac{10}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Cacao	2223	$0.3 \times \frac{10}{10000}$	$0.3 \times \frac{10}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Cultivos permanentes arbóreos	223	$0.3 \times \frac{15}{10000}$	$0.3 \times \frac{15}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Otros cultivos permanentes arbóreos	2231	$0.3 \times \frac{15}{10000}$	$0.3 \times \frac{15}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Palma de aceite	2232	$0.3 \times \frac{15}{10000}$	$0.3 \times \frac{15}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$
Cultivos agroforestales	224	$0.3 \times \frac{45}{10000}$	$0.3 \times \frac{45}{10000}$	$0.4 \times \frac{148}{10000}$	$0.3 \times \frac{95.5}{10000}$	$0.3 \times \frac{95.5}{10000}$
Pastos y árboles plantados	2241	$0.3 \times \frac{45}{10000}$	$0.3 \times \frac{45}{10000}$	$0.4 \times \frac{56.6}{10000}$	$0.3 \times \frac{95.5}{10000}$	$0.3 \times \frac{95.5}{10000}$
Cultivos y árboles plantados	2242	$0.3 \times \frac{45}{10000}$	$0.3 \times \frac{45}{10000}$	0	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$	$0.5 \times \frac{142.4}{10000}$

Tabla 48. Valores de carga presuntivas determinadas con las ecuaciones de la Tabla 47. Cálculo de cargas presuntivas por cobertura de la tierra

Cobertura	Código	PO (kg.d-1.m-2)	PI (kg.d-1.m-2)	N (kg.d-1.m-2)	NH4 (kg.d-1.m-2)	NO3 (kg.d-1.m-2)
Otros cultivos transitorios	211	3.29E-06	7.67E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Cereales	212	6.58E-06	1.53E-05	0	1.95E-05	1.95E-05
Arroz	2121	9.04E-07	2.11E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Maíz	2122	4.11E-06	9.59E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Sorgo	2123	6.58E-06	1.53E-05	0	1.95E-05	1.95E-05
Soya	2134	5.34E-06	1.25E-05	0	1.95E-05	1.95E-05
Cebolla	2141	1.64E-05	3.84E-05	0	1.95E-05	1.95E-05
Papa	2151	5.75E-06	1.34E-05	0	1.95E-05	1.95E-05
Cultivos permanentes herbáceos	221	3.29E-06	7.67E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Otros cultivos permanentes herbáceos	2211	3.29E-06	7.67E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Caña	2212	8.22E-06	1.92E-05	0	1.95E-05	1.95E-05
Cultivos permanentes arbustivos	222	8.22E-07	1.92E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Cacao	2223	8.22E-07	1.92E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Cultivos permanentes arbóreos	223	1.23E-06	2.88E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Otros cultivos permanentes arbóreos	2231	1.23E-06	2.88E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Palma de aceite	2232	1.23E-06	2.88E-06	0	1.95E-05	1.95E-05
Cultivos agroforestales	224	3.7E-06	8.63E-06	1.62E-05	7.85E-06	7.85E-06
Pastos y árboles plantados	2241	3.7E-06	8.63E-06	6.2E-06	7.85E-06	7.85E-06
Cultivos y árboles plantados	2242	3.7E-06	8.63E-06	0	1.95E-05	1.95E-05

9.3.4.2 Sector pecuario

Siguiendo la investigación de Iglesias-Martínez (1994), se establece que un bovino adulto (con un peso vivo de 550 kg) produce un promedio de 22 kg de estiércol diariamente. Basándonos en este valor y siguiendo las pautas proporcionadas por Iglesias-Martínez (1994), se llevaron a cabo cálculos para determinar las contribuciones de nitrógeno, fósforo, sólidos y DBO, los cuales se encuentran detallados en la **Tabla 49**.

Para los aportes de fósforo, se asume una distribución equitativa del 50% entre los diferentes tipos de fósforo. Por otro lado, dado que el nitrógeno contenido en el estiércol bovino se encuentra mayormente en forma de amonio (NH₄), se considera una distribución del 100% para este componente.

Tabla 49. Producción y composición de estiércol de diferentes tipos de estiércol

Estiércol	Producción (kg/año)	Materia seca (g/kg)	Materia orgánica (g/kg)	Nitrógeno (g/kg)	Fósforo (g/kg)	Potasio (g/kg)
Purín de ganado vacuno	20200	95	68	4.4	0.9	4.2
Purín de cerdo	1600	80	63	7	2.1	3.3
Purín de gallina	80	160	115	9	4.1	3.7
Gallinaza (gallina ponderada por año)	40	322	230	12.5	8.2	7.5
Gallinaza (una plaza de cebo por año)	7	560	460	23	9.2	13.3
Purín de ternero de cebo	2200	20	15	3	0.6	2

Fuente: Iglesias-Martínez (1994)

En relación con los coliformes fecales para bovinos, se consideraron las cargas registradas en el estudio de Heras-Sierra et al. (2016), quienes reportaron valores de 5.3 y 5.8 [log₁₀ UFC/g de estiércol]. Esto se complementa con una cifra de 5.5 [log₁₀ UFC/g de estiércol] para los coliformes fecales. Luego para aves se utilizarán valores de producción fecal per cápita y concentración de UFC en estiércol obtenidos de la literatura, en este caso asociados a gansos como las aves acuáticas más similares y de menor tamaño, para los cuales la producción de estiércol per cápita es de 160 [g] diarios por animal con concentraciones promedio de 8.8E6[UFC/g] (Meerburg et al., 2011). No obstante, se considera que las aves que hay son pequeñas (entre 250 y 1000 g), por ende, se considera que un ave produce el 2% de su peso corporal en estiércol. Se asume que un ave produce 80 g/día de heces con una concentración de 8.8E6 [CFU g⁻¹] de coliformes fecales. En cuanto a los cerdos, la American Society of Agricultural Engineers (2005) Indica

que un cerdo produce 84 kg de estiércol por cada 1000 kg de peso. Por ende, se propone un valor de producción de 5.8 kg/día, asumiendo un cerdo maduro, con peso de 154 lb (aprox 70 kg). De la misma forma, se indica que un cerdo produce 1.8E8[CFU/kg]. El resumen de las cargas estimadas para los bovinos se encuentra presentado de manera integral en la **Tabla 50**.

Tabla 50. Cargas presuntivas para bovinos y aves y cerdos

Cargas para Bovinos			Cargas para aves			Cargas para cerdos		
Estiércol (kg)	22		Estiércol (g)	75		Estiércol (kg)	5.8	
Determinante	Valor	Unidad	Determinante	Valor	Unidad	Determinante	Valor	Unidad
SST	0	g/animal.d	SST	0	g/animal.d	SST	0	g/animal.d
CT	6.96E+09	UFC/animal.d	CT	6.60E+08	UFC/animal.d	CT	1.04E+09	UFC/animal.d
PO	19.8	g/animal.d	PO	0.3075	g/animal.d	PO	12.18	g/animal.d
PI	9.9	g/animal.d	PI	0.3075	g/animal.d	PI	12.18	g/animal.d
NO	0	g/animal.d	NO	0	g/animal.d	NO	0	g/animal.d
NH4	96.8	g/animal.d	NH4	0.675	g/animal.d	NH4	40.6	g/animal.d
NO3	0	g/animal.d	NO3	0	g/animal.d	NO3	0	g/animal.d
OD	0	g/animal.d	OD	0	g/animal.d	OD	0	g/animal.d
DBO5	1496	g/animal.d	DBO5	8.625	g/animal.d	DBO5	365.4	g/animal.d
Hg0	0	g/animal.d	Hg0	0	g/animal.d	Hg0	0	g/animal.d
Hg2	0	g/animal.d	Hg2	0	g/animal.d	Hg2	0	g/animal.d
MeHg	0	g/animal.d	MeHg	0	g/animal.d	MeHg	0	g/animal.d

9.3.4.3 Sector doméstico

Para este sector, se utilizó las cargas presuntivas para un ser humano, reportadas en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS para Colombia y resumidas en la **Tabla 51**.

Tabla 51. Cargas presuntivas para población

Determinante	Valor	Unidad
SST	90	g/hab.d
CT	2.00E+11	UFC/hab.d
PO	1	g/hab.d
PI	2	g/hab.d
NO	4	g/hab.d
NH4	8	g/hab.d
NO3	0	g/hab.d
OD	0	g/hab.d
DBO5	50	g/hab.d
Hg0	0	g/hab.d
Hg2	0	g/hab.d
MeHg	0	g/hab.d

Fuente: MVCT (2017)

9.3.4.4 Sector de hidrocarburos

Dado que se está considerando la fuente contaminación por la producción de barriles de petróleo, para cada pozo se estiman las cargas de los DCA utilizando los límites permisibles para vertimiento establecidos por MADS (2015) (ver Tabla 52). Sin embargo, estos valores están asociados a un volumen de vertimiento. Por consiguiente, se tomaron las cantidades de agua vertidas que en promedio realiza un pozo petrolero en la fase de producción, de acuerdo con lo reportado por IDEAM (2011) (ver **Tabla 52**)

Tabla 52. Cargas presuntivas para producción de hidrocarburos

Producción		
Determinante	Valor	Unidad
SST	50.00	mg/l
CT	0.00	mg/l
PO	2.00	mg/l
PI	0.00	mg/l
NO	10.00	mg/l
NH4	0.00	mg/l
NO3	0.00	mg/l
OD	0.00	mg/l
DBO5	60.00	mg/l

Producción		
Determinante	Valor	Unidad
Hg0	0.00	mg/l
Hg2	0.00	mg/l
MeHg	0.00	mg/l

Tabla 53. Factores de uso de agua en las fases productivas en hidrocarburos

Fases - Actividades	Unidad	Valor
Producción		
Consumo de agua uso industrial	m3/Barril producido	0.106
Consumo de agua uso doméstico	m3/Barril producido	0.004
Vertimientos industriales	m3/Barril producido	0.095
Vertimientos domésticos	m3/Barril producido	0.002
Aguas de producción	m3/Barril producido	1.56
Reinyección para recobro mejorado	m3 de agua reinyectada/m3 de agua de producción	0.118
Inyección como disposición final	m3 de agua reinyectada/m3 de agua de producción	0.461
Vertimiento a cuerpos de agua	m3 de agua vertida/m3 de agua de producción	0.417
Riego en vías	m3 de agua vertida/m3 de agua de producción	0.002
Aspersión	m3 de agua vertida/m3 de agua de producción	0.001
Vertimiento entregado a terceros	m3 de agua vertida/m3 de agua de producción	0.00056

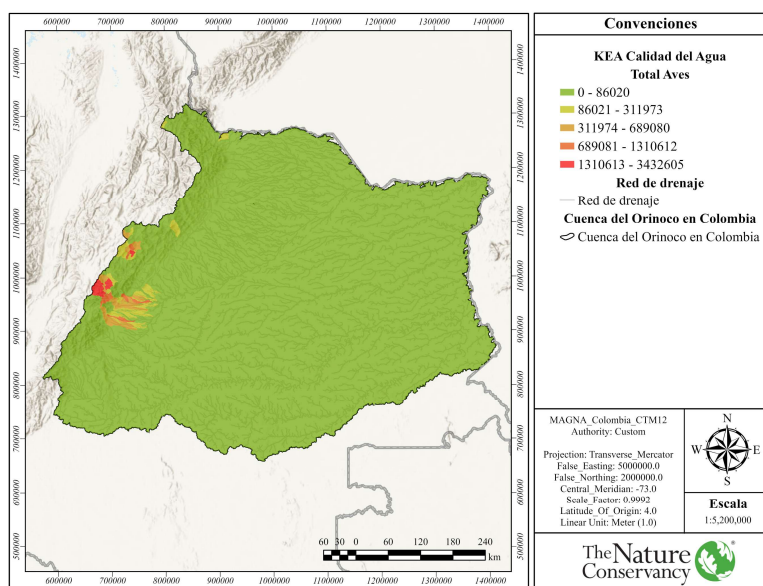
9.3.4.5 Sector minero

De acuerdo con Díaz et al. (2020), las relaciones de uso de mercurio en Colombia son de 4 mg de mercurio por cada mg de oro procesado. Tomando en cuenta la especiación considerada, las cargas presuntivas para el sector minero serían las presentadas en la **Tabla 54**.

Tabla 54. Cargas presuntivas para minería de oro

Determinante	Valor	Unidad
SST	0.00	mg/mg-Au
CT	0.00	mg/mg-Au
PO	0.00	mg/mg-Au
PI	0.00	mg/mg-Au
NO	0.00	mg/mg-Au
NH4	0.00	mg/mg-Au
NO3	0.00	mg/mg-Au
OD	0.00	mg/mg-Au
DBO5	0.00	mg/mg-Au
Hg0	4.00E-05	mg/mg-Au
Hg2	4.00E+00	mg/mg-Au
MeHg	4.00E-05	mg/mg-Au

Figura 153. Numero de aves por UHA en la VRO



9.3.5 Calidad del agua de la VRO

La distribución espacial de los determinantes de calidad el agua simulados mediante el modelo MCAES se presenta en la **Figura 154** a la **Figura 166**.

Figura 154. Distribución espacial de concentración de solidos suspendidos totales en la VRO

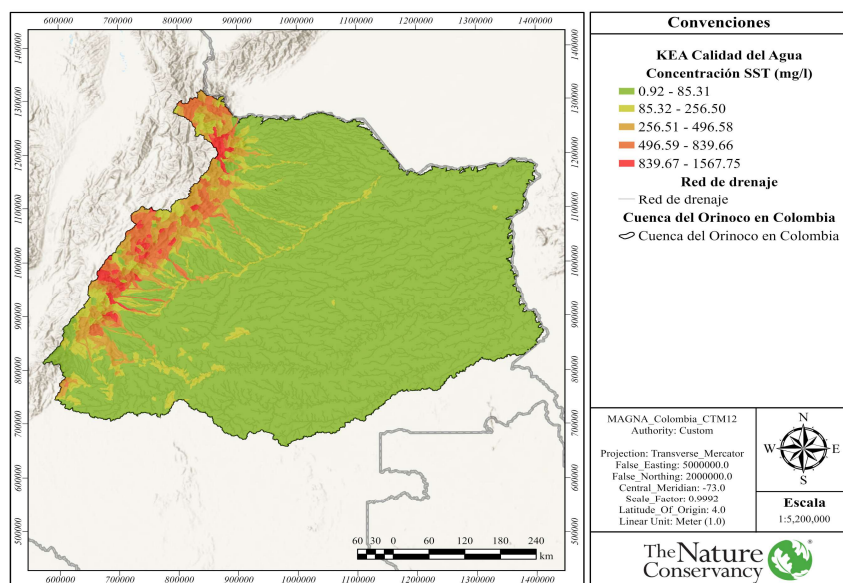


Figura 155. Distribución espacial de temperatura del agua totales en la VRO

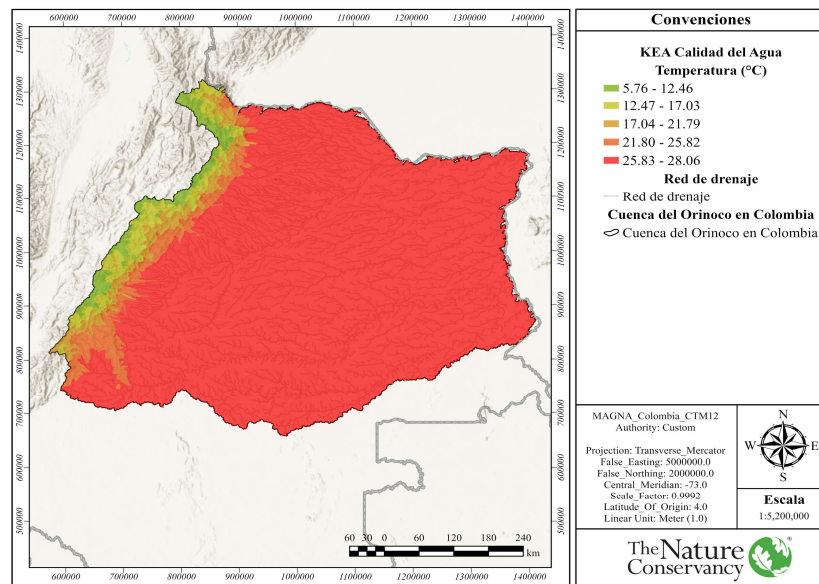


Figura 156. Distribución espacial de concentración de coliformes totales en la VRO

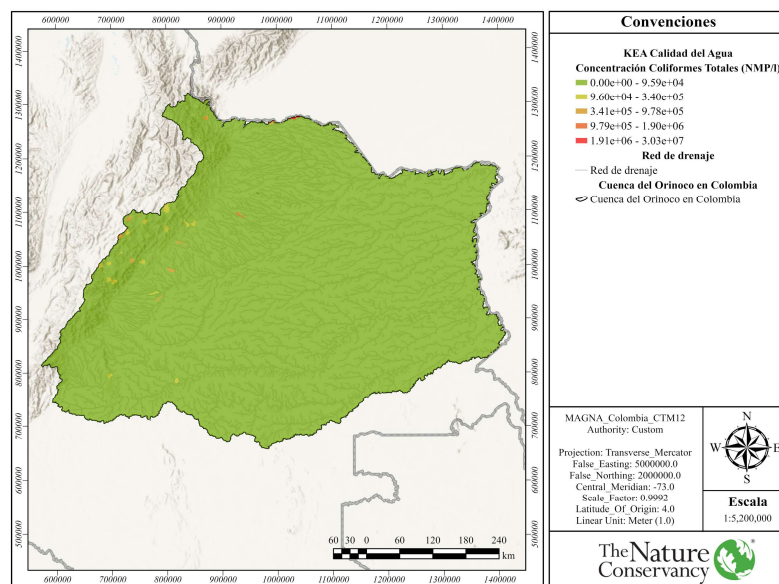


Figura 157. Distribución espacial de concentración de fósforo orgánico en la VRO

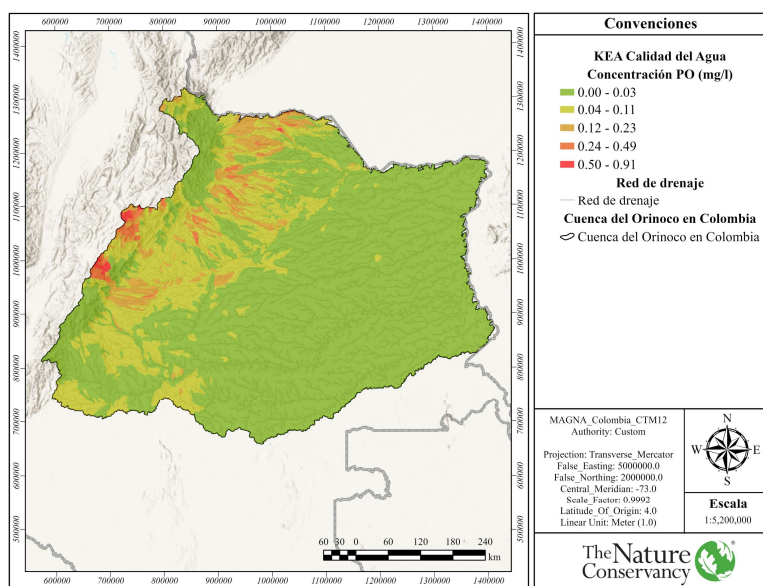


Figura 158. Distribución espacial de concentración de fósforo inorgánico en la VRO

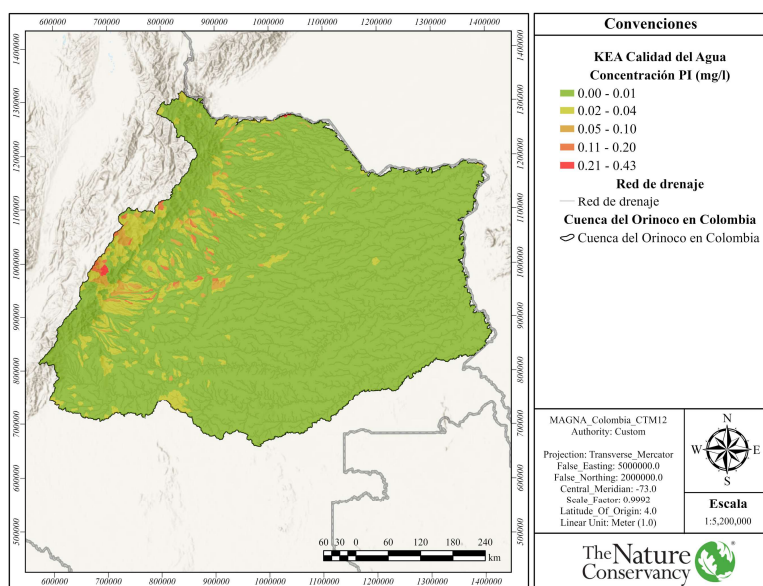


Figura 159. Distribución espacial de concentración de nitrógeno orgánico en la VRO

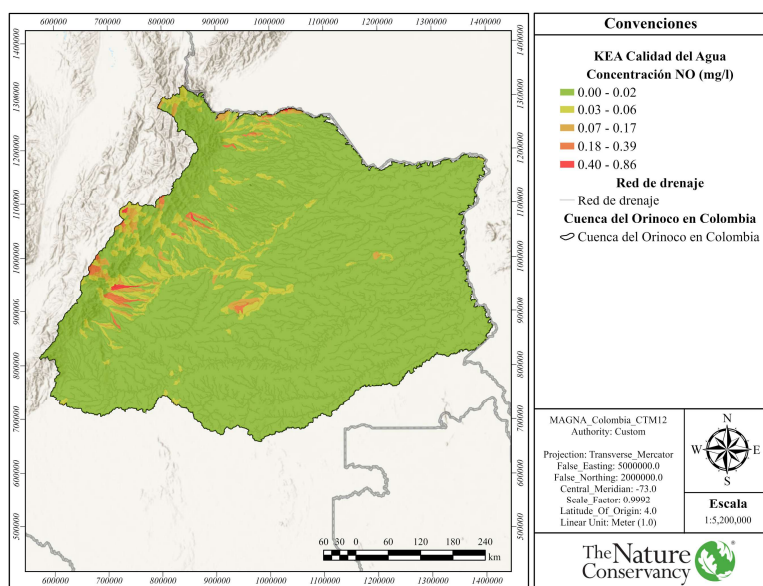


Figura 160. Distribución espacial de concentración de nitratos en la VRO

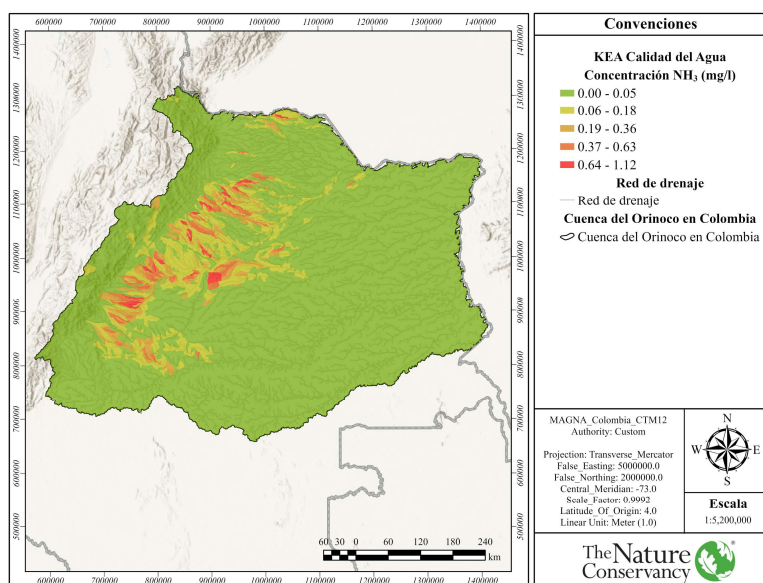


Figura 161. Distribución espacial de concentración de nitrógeno amoniacal en la VRO

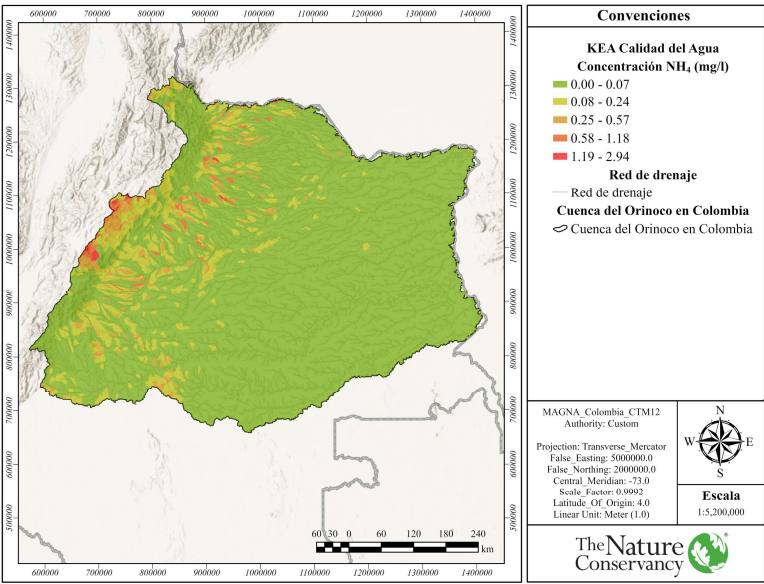


Figura 162. Distribución espacial de concentración de oxígeno disuelto en la VRO

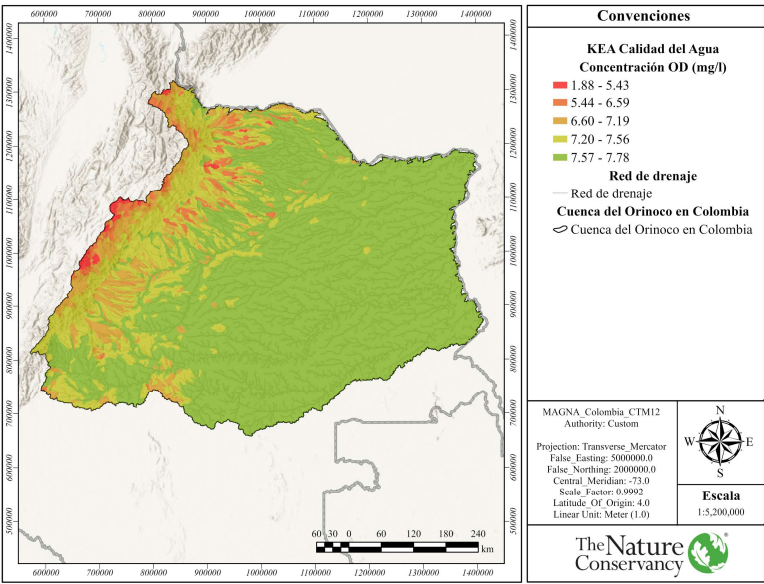


Figura 163. Distribución espacial de concentración de oxígeno de saturación en la VRO

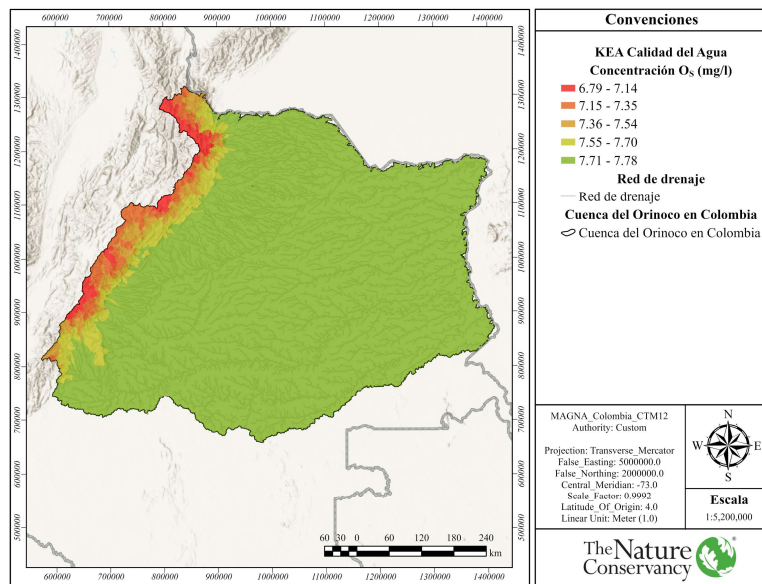


Figura 164. Distribución espacial de concentración de mercurio elemental en la VRO

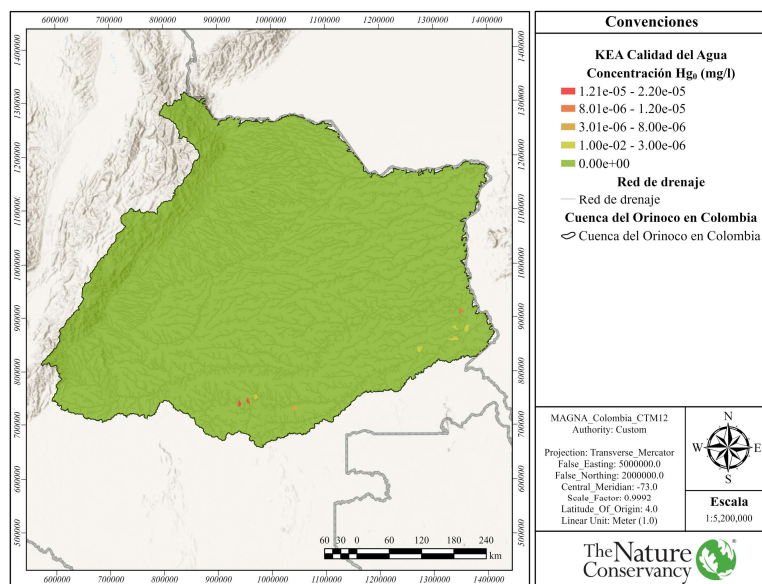


Figura 165. Distribución espacial de concentración de mercurio divalente en la VRO

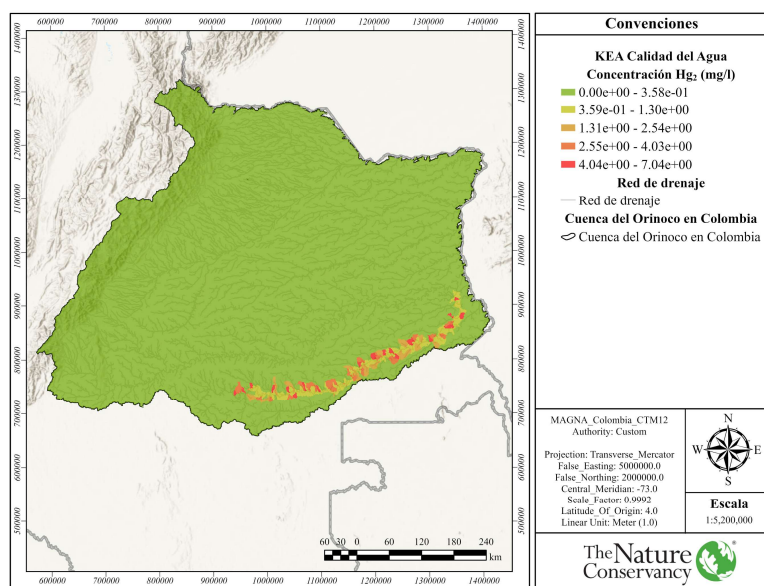
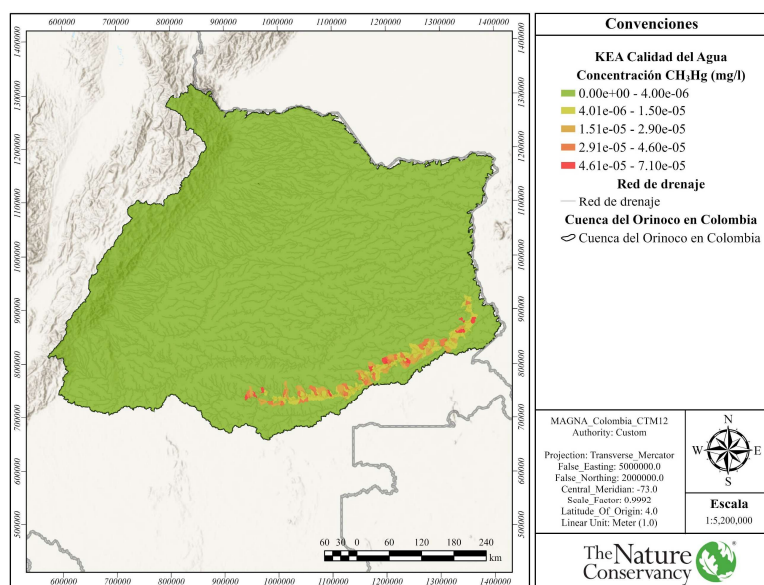


Figura 166. Distribución espacial de concentración de metilmercurio en la VRO



9.3.6 Indicador de atributo

La composición química de las aguas determina muchas de las propiedades ecológicas en los ecosistemas (Ríos-Villamizar et al., 2020). En la VRO se distinguen tres tipologías de aguas:

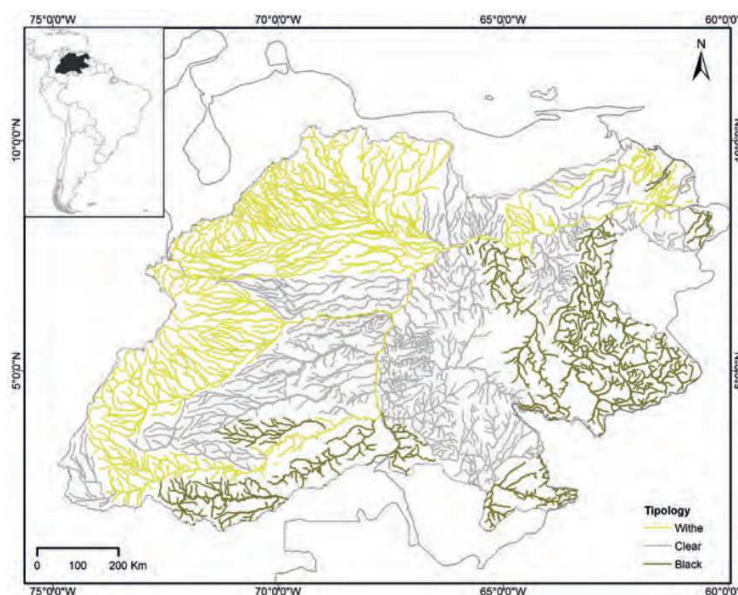
- **Ríos de aguas negras:** Describe ríos que tienen aguas oscuras producto de la alta concentración de materia orgánica en descomposición (alto contenido de sustancias húmicas y ácidos fúlvicos) y minerales disueltos en el agua. Por lo general se originan en dentro del bosque húmedo (Maco-García, 2006)

- **Ríos de aguas claras:** Describen ríos que generalmente tienen una baja concentración de sedimentos y de nutrientes disueltos en el agua (Maco-García, 2006).
- **Ríos de aguas blancas:** Presentan aguas lodosas, turbias, debido al alto contenido de arena, arcilla y limo en suspensión, que proporcionan una coloración marrón claro a sus aguas. Por lo general son de origen Andino (Cordillera de los Andes) (Maco-García, 2006).

De acuerdo con Maco-García (2006), cada tipología refleja características físicas, químicas y biológicas particulares de unos ambientes. Por tanto, se consideró esta clasificación como indicador de atributo para el KEA de calidad del agua, en la vertiente del Orinoco en Colombia.

Las tipologías de aguas para toda la VRO se extrajeron del trabajo realizado por Morales-Betancourt et al. (2014) para toda la cuenca del Orinoco (ver **Figura 167**). A cada una de las 4243 microcuencas se le asignó la tipología de acuerdo con la distribución presentada en la **Figura 167**.

Figura 167. Cuenca del Orinoco y su tipología de aguas de acuerdo con la clasificación de Sioli (1965, 1975)



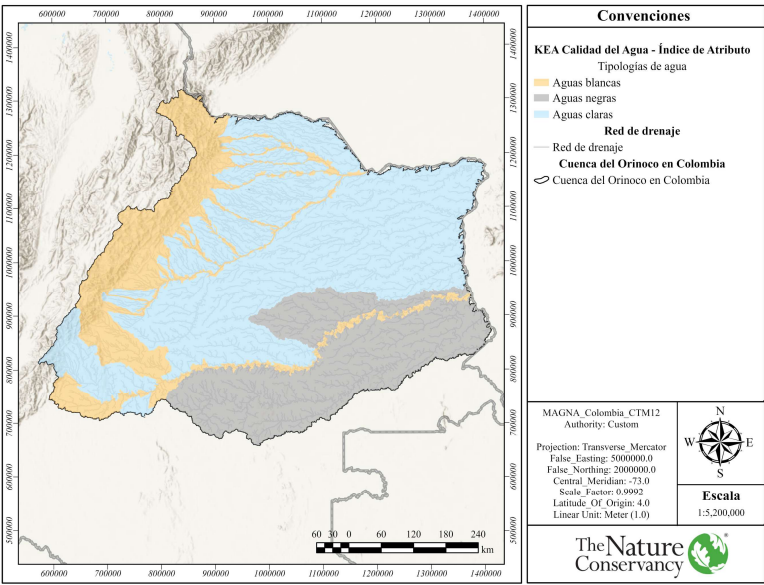
Fuente: Morales-Betancourt et al. (2014)

Así mismo, los resultados fueron ajustados con el aporte de Tomas Walschburger, quien desempeña el cargo de Asesor Senior de Ciencias para The Nature Conservancy - Colombia. Thomas ha dedicado muchos años a la investigación y el monitoreo en la VRO, experiencia que lo llevó a residir durante varios años en la región y a realizar extensos recorridos por casi todos los ríos de la cuenca, llevando a cabo monitoreos fisicoquímicos y biológicos, por lo que posee una amplia experiencia en torno a las tipologías de agua en el contexto amazónico.

Las tipologías generadas por Morales-Betancourt et al. (2014), se modificaron en la parte alta de la cuenca del río Guaviare, específicamente en la cuenca del río Losada, dado que en esta zona el frente de deforestación se ha exacerbado significativamente del año 2012 hasta el 2018, por tanto, se cambió la clasificación de aguas claras a aguas blancas. Así mismo, se efectuaron modificaciones en las cuencas del Caño La Tigra, Caño Los Perros, Caño Los Cachicamos, Caño La Ceiba, Caño La Cabra, Caño Correntoso, Caño Yarumales y Caño Tres Islas ya que estos ríos no nacen en la zona de la cordillera de los Andes y, además, poseen una cobertura de bosque densa. En consecuencia, se cambia la tipología de aguas blancas a claras. Estas modificaciones también se corroboraron con los valores de concentración

de sedimentos en suspensión modelados para la vertiente. La distribución espacial final de las tipológicas de agua para la vertiente del Orinoco en Colombia se presenta en la **Figura 168**.

Figura 168. Tipologías de aguas de la VRO



9.3.7 Indicador de integridad

Con los resultados del modelo MCAES, se calculan los subíndices de cada determinante de calidad del agua y con estos se estima el indicador de integridad de calidad del agua. Los subíndices para cada determinante de calidad del agua considerado se presentan en la Tabla 55. Específicamente, para el mercurio total, se considera un subíndice binario (buena = 1 y mala = 0), de acuerdo con el límite permisible (0.001 mg-Hg/L) definido por MPS & MADS (2007) para Colombia.

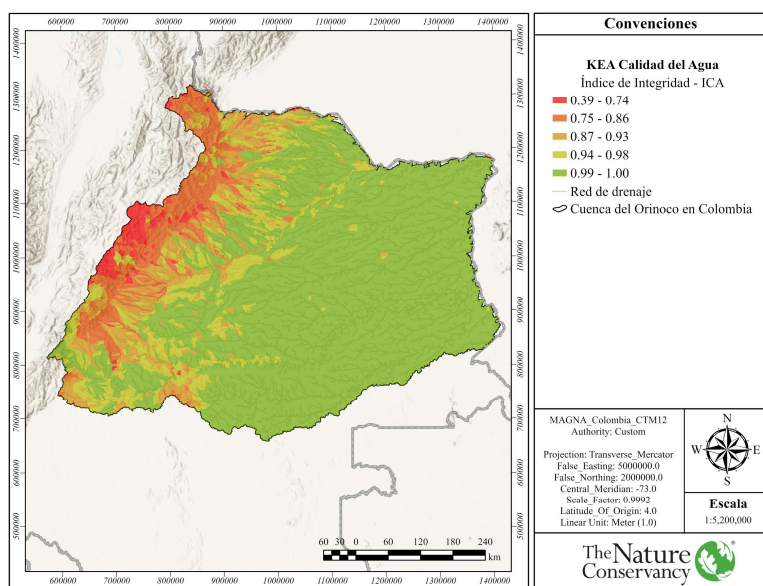
Tabla 55. Subíndices considerados para cada uno de los determinantes de la calidad del agua considerados en el índice de calidad del agua.

Subindicadores		
Determinante de calidad del agua	Ecuación de subindicador	Fuente
Oxígeno disuelto	$S_{WQ_{DO}} = \left(1 - \left(0.01 * \frac{DO}{O_s} \right) \right)$	Orjuela and López (2011)
Sólidos en suspensión	$S_{WQ_{SS}} = 1 - (-0.02 + (0.003 * SS))$	Orjuela and López (2011)
Nitrógeno total (NO + NH4 + NO3)	$S_{WQ_{TN}} = 1 - (0.5 \log_{10} TN)$	Armida (2007)
Fósforo total (Po + Pi)	$S_{WQ_{TP}} = 1 - (0.6 + 0.4 \log_{10} TP)$	Armida (2007)
Organismos patógenos	$S_{WQ_X} = 1 - (-1.44 + 0.56 \log_{10} X)$	Armida (2007)
Materia orgánica	$S_{WQ_{OM}} = 1 - (-0.05 + 0.7 \log_{10} OM)$	Ramírez et al. (1997)
Mercurio total	$S_{WQ_{THg}} = \begin{cases} (THg > 0.001 \text{ mg/l}) = 0 \\ (THg \leq 0.001 \text{ mg/l}) = 1 \end{cases}$	Ministerio de Salud y Protección Social and Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2007)

Fuente: Nogales et al. (2023)

La distribución espacial del indicador de integridad para calidad del agua se presenta en la **Figura 169**.

Figura 169. KEA Calidad del Agua – Índice de integridad

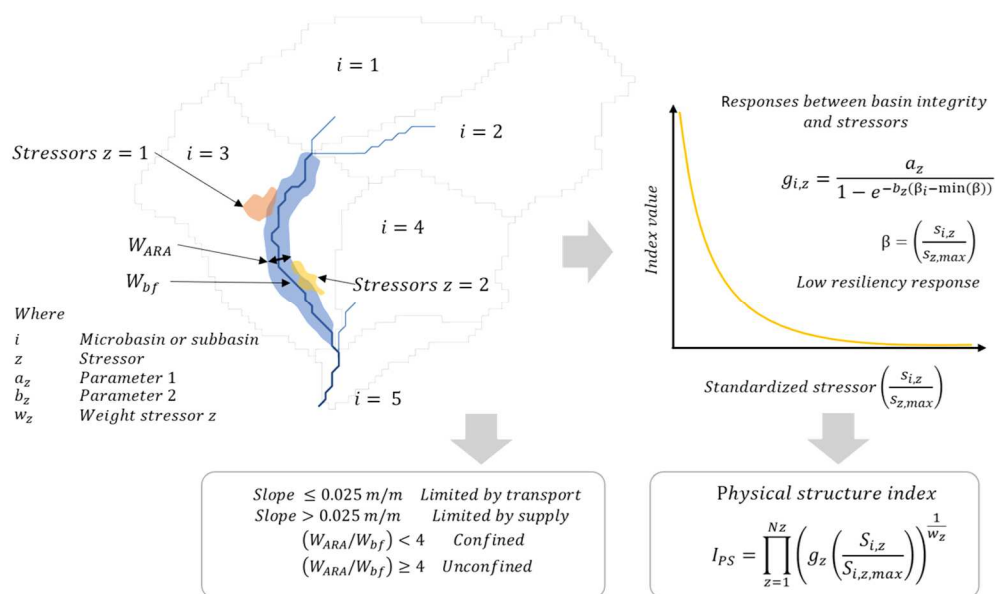


En cuanto a la calidad del agua, se observa que la mayoría de la cuenca exhibe valores elevados de integridad, lo cual se corresponde con las áreas de bosque que aún no han sido intervenidas y que han experimentado una menor presión antropogénica. En contraste, la zona alta de la cuenca, que es la más afectada por la actividad humana y constituye el epicentro de la deforestación, muestra niveles de integridad más bajos, donde la ganadería desempeña un papel predominante. También se identifican áreas de integridad reducida en la región de la cordillera de los Andes, lo cual era de esperarse, dado que esta zona concentra la mayor parte de la población y la actividad económica en la cuenca.

9.4 KEA – Estructura física

Para este caso en particular, no fue requerido la construcción de un modelo matemático. La información necesaria para calcular estos indicadores se obtuvo a partir de datos secundarios previamente recopilados para la VRO. Por lo tanto, se llevaron a cabo procesos de procesamiento espacial para asignar la información correspondiente a cada unidad de análisis. La síntesis del enfoque metodológico empleado se ilustra en la **Figura 170**.

Figura 170. Representación esquemática del cálculo de los dos grupos de índices de estructura física



La información utilizada para la caracterización del KEA de Estructura Física, así como los modelos y herramientas de análisis pueden ser consultadas en el **Anexo 4**.

9.4.1 Indicadores de atributo

De acuerdo con los indicadores seleccionados en el numeral 7, para determinar el grado de confinamiento de las unidades de análisis, se evaluó la relación entre el ancho de la llanura de inundación o área del canal activo (W_{ARA}) y el ancho de banca llena (W_{bf}). Según Beechie et al. (2006), si $(W_{ARA}/W_{bf}) < 4$, el río se considera confinado; en caso contrario, se considera no confinado. Se utilizaron los valores de ancho de banca llena presentados en el numeral 9.2.1.3. De la misma forma, se calcularon los valores de W_{ARA} utilizando el Índice Multirresolución de Planitud del Fondo del Valle -MRVBF- (Gallant and Dowling, 2003) con un umbral de 2, coherente con el mapa de humedales de Colombia 2020 (Burbano-Girón et al., 2020). Lo anterior, permite obtener el ancho del valle, obteniendo el área total de los píxeles que están por debajo del umbral planteado, y dividiéndola posteriormente por la longitud del cauce. La **Figura 171** muestra los resultados de la obtención del MRVBF. De la misma forma, la **Figura 172** presenta la clasificación de Beechie et al. (2006) para tramos confinados u no confinados.

Figura 171. Distribución espacial del Multiresolution Valley Bottom Flatness para la VRO

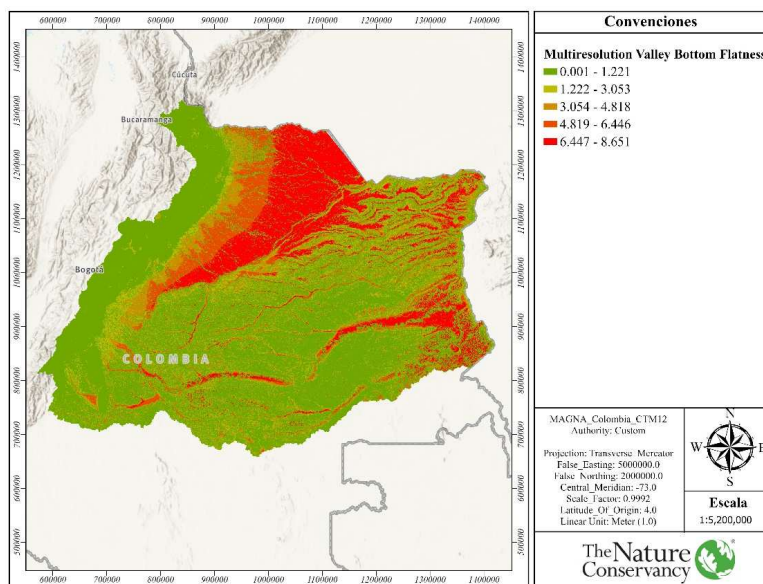
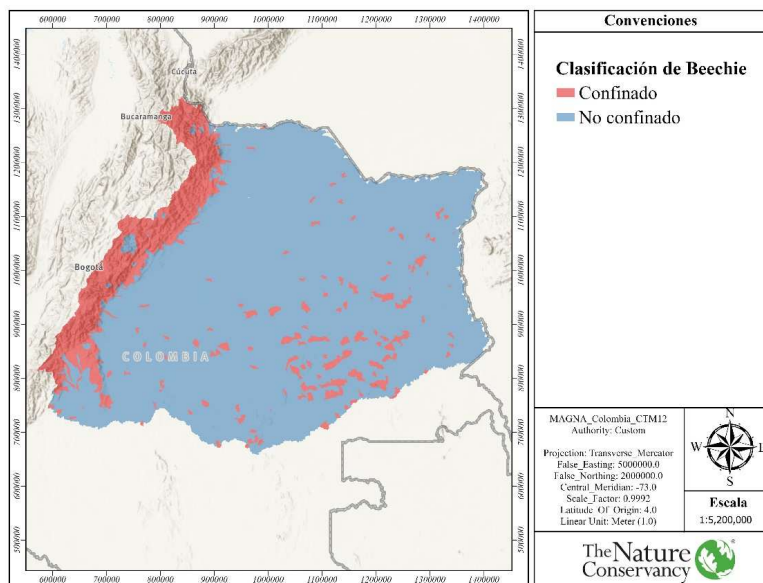


Figura 172. Distribución espacial de cauces confinados y no confinados en la VRO



En lo que respecta a la categorización de limitados por transporte y limitados por suministro, se tomó los valores que fueron estimados para el KEA de flujo de sedimentos (ver numeral 9.2.1.2).

9.4.2 Indicadores de integridad

Como se mencionó en el numeral 8.3, el indicador de integridad para este KEA sigue el planteamiento de evaluación de la integridad propuesto por Flotemersch et al., (2016). Para su cálculo, Es necesario identificar los factores de riesgo específicos, o factores estresantes de la estructura física. Thornbrugh et al. (2018) presenta una lista de los principales factores estresantes que afectan varias funciones de los ecosistemas (ver **Figura 173**).

Figura 173. Funciones clave que ocurren en cuencas inalteradas y los principales factores estresantes que afectan estas funciones.

Key function	Description	Major stressors	
		Within channel	Outside channel
Hydrologic regulation (HYD)	Maintenance of the natural timing, pattern, supply, and storage of water that flows through the watershed	• Presence and volumes of reservoirs (NABD) • Stream channelization and levee construction (NA)	• Percent of the watershed comprising agricultural land use (NLCD) • Total length and density of canals/ditches (NHD) • Percent imperviousness of human-related landscapes (NLCD) • Alteration to and spatial arrangement of riparian vegetation (LANDFIRE) • Boundaries, depths, and flows of aquifers (NA) • Groundwater use (NA)³
Regulation of water chemistry (CHEM)	Maintenance of the natural timing, supply, and storage of the major chemical constituents of freshwaters: nutrients (nitrogen & phosphorus), salinity or conductivity, total dissolved solids, hydrogen ions (pH), and naturally occurring minor constituents (e.g., heavy metals). Human-related alterations can include deviations from naturally occurring concentrations of these constituents or the inclusion of non-naturally occurring constituents, such as pesticides and industrial chemicals.	• Presence and volumes of reservoirs (NABD) • Stream channelization and levee construction (NA)	• Atmospheric deposition of anthropogenic sources of nitrogen and acid rain (NADP) • Percent of watershed composed of urban or agricultural land uses (NLCD) • Fertilizer application rates (FERT) • Presence and density of wastewater treatment facilities (NPDES), industrial facilities (TRI), superfund sites (SUPERFUND), or mines (MINES) • Cattle density (NA)³ • Alteration to and spatial arrangement of riparian vegetation (LANDFIRE) • Chemical constituents of groundwater (NA)
Sediment regulation (SED)	Maintenance of the volume and size composition of inorganic particles that are stored or transported through the stream or within lakes, wetlands, or estuaries.	• Presence and volumes of reservoirs (NABD) • Stream channelization and levee construction (NA)	• Alteration to and spatial arrangement of riparian vegetation (LANDFIRE) • Presence and density of mines (MINES), forest cover loss (GFC), and roads (TIGER) • Agriculture (NLCD) weighted by soil erodibility (CONUS-SOIL)
Hydrologic connectivity (CONN)	Presence of hydrologic pathways for the transfer of matter, energy, genes, and organisms within watersheds. Systems can vary naturally in their hydrologic isolation (e.g., desert springs) or connectedness (e.g., the Everglades).	• Presence and volumes of reservoirs (NABD) • Stream channelization and levee construction (NA) • Road/stream intersections (TIGER/NHD) weighted by stream reach slope (NHD)	• Alteration to and spatial arrangement of riparian vegetation (LANDFIRE) • Density of ditches/canals (NHD) • Groundwater use (NA)³ • Presence and density of wastewater discharge sites (NPDES) • Percent of riparian zone composed of urban or agricultural land uses (NLCD)
Temperature regulation (TEMP)	Maintenance of the full range of natural landscape features (both aquatic and terrestrial) required to maintain temperatures that support the aquatic chemistry and biota.	• Presence and volumes of reservoirs (NABD)	• Alteration to and spatial arrangement of riparian vegetation (LANDFIRE) • Percent of watershed composed of agricultural land uses (NLCD) • Percent of watershed composed of urban land uses in the riparian zone (NLCD) • Groundwater use (NA)³ • Presence and density of wastewater discharge sites (NPDES)
Habitat provision (HABT)	Presence and maintenance of the full range of natural landscape features (both aquatic and terrestrial) that represent the complete set of conditions that are needed to maintain the natural diversity and abundances of aquatic biota.	• Presence and volumes of reservoirs (NABD)	• Alteration to and spatial arrangement of riparian vegetation (LANDFIRE) • Density of housing unit developments within riparian zones (TIGER) • Percent of watershed composed of agricultural land uses (NLCD) • Density of road/stream intersections (TIGER/NHD) • Density of roads within riparian zones (TIGER)

Fuente: Thornbrugh et al. (2018)

De acuerdo con lo sugerido por Thornbrugh et al. (2018), se seleccionaron siete factores de estrés que afectan a la estructura física de la VRO (ver Tabla 56). La distribución espacial de cada uno de estos se presenta de la **Figura 174** a la **Figura 179**.

Tabla 56. Factores de estrés que afectan a la estructura física en la VRO

Factor de estrés (S_j)	Unidad	Descripción	Fuente
Presencia de vías	km/km ²	km de vías por área UHA	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2022)
Presencia de zona urbana	km ² / km ²	Área de zonas urbanas por UHA	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2018)
Presencia de pozos petrolíferos	Número/ km ²	Numero de posos por km ² de UHA	Agencia Nacional de Hidrocarburos (2022)
Presencia de títulos mineros	km ² / km ²	Área de zonas mineras por km ²	Unidad de Planeación Minero-Energética (2022b)
Densidad de zonas quemadas	km ² / km ²	Área de zonas quemadas por km ² de UHA	Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (2022a)
Densidad de zonas deforestadas (perdida de área natural)	km ² / km ²	Área de zonas deforestadas por km ² de UHA	Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (2020)
Densidad de humedales transformados	km ² / km ²	Área de humedales transformados por km ² de UHA	Burbano-Girón et al. (2020)

Figura 174. Kilómetros de vías

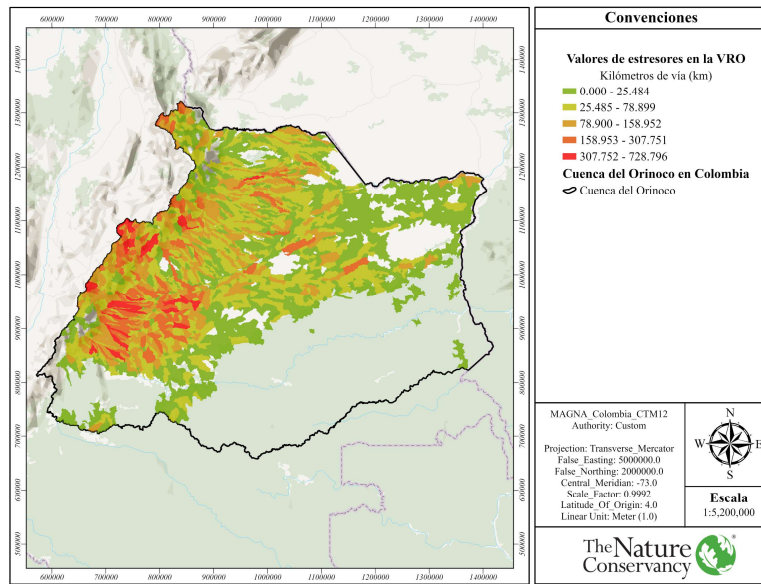


Figura 175. Número de pozos petroleros en la VRO

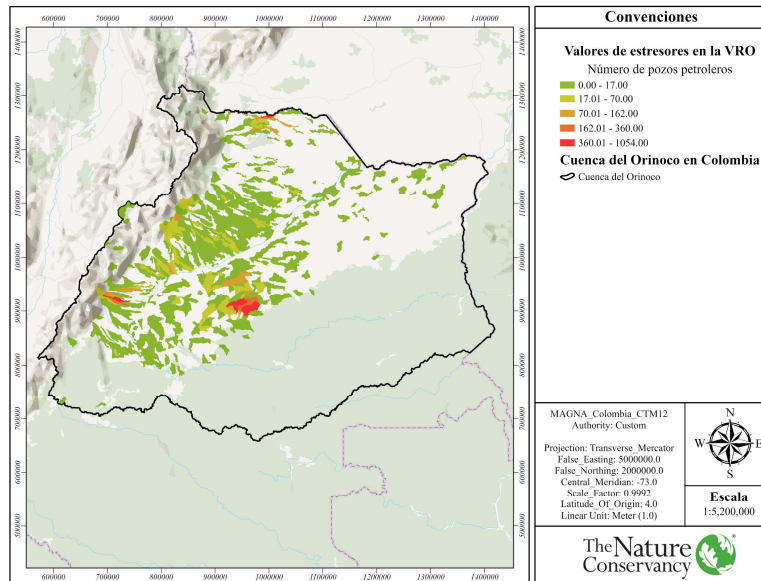


Figura 176. Área urbanizada en la VRO

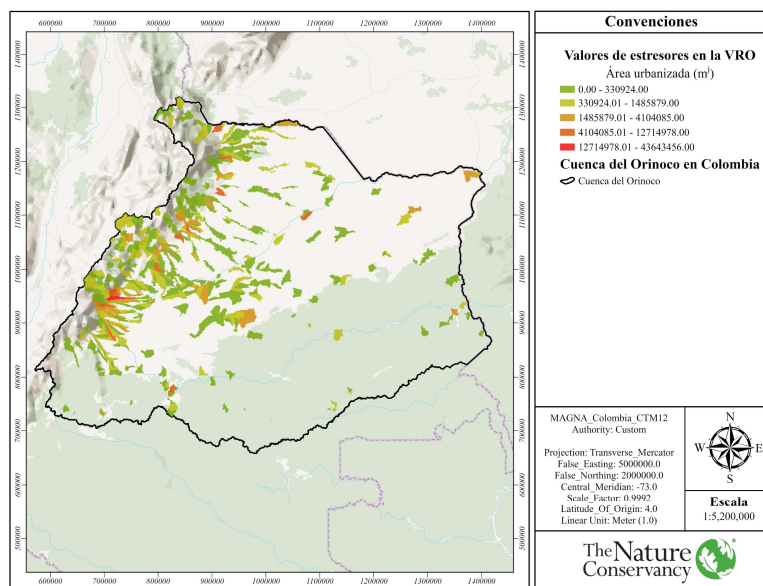


Figura 177 Área quemada en la VRO

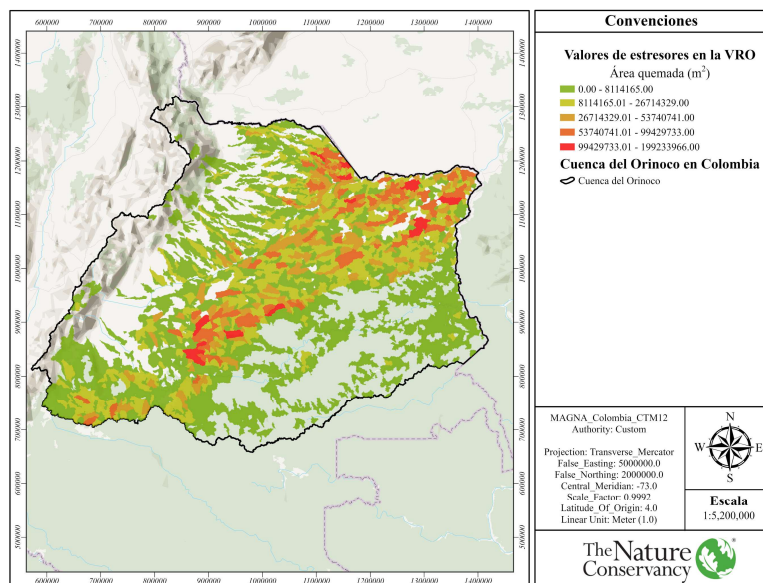


Figura 178 Área deforestada en la VRO

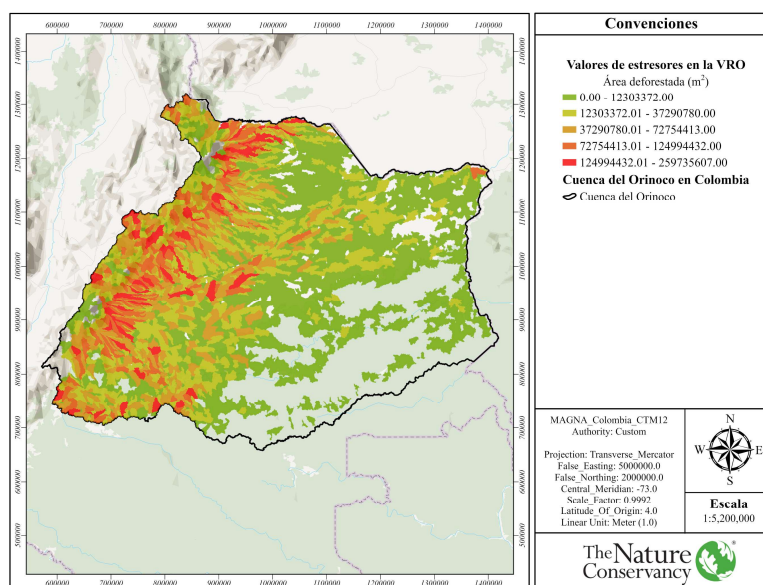
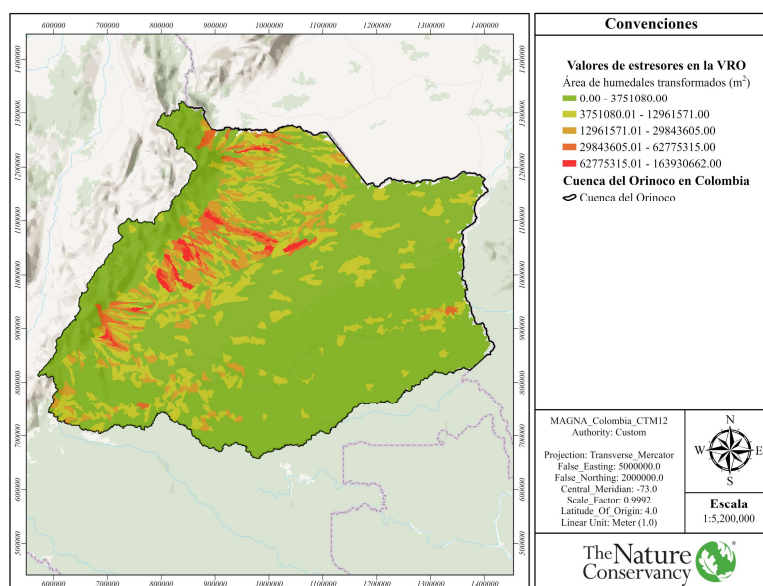
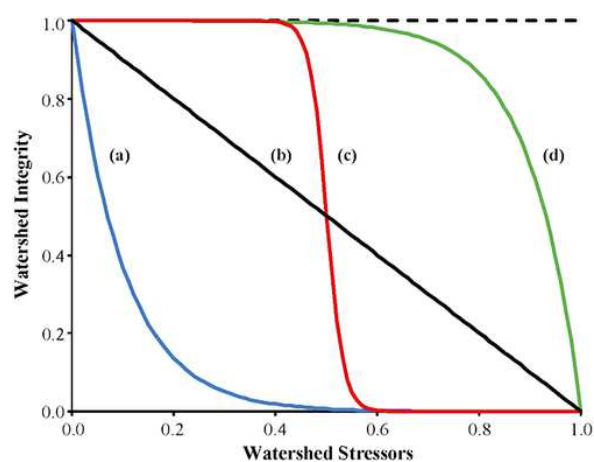


Figura 179. Humedales Transformados en la VRO



Cada estresor se normaliza utilizando el valor máximo registrado en la cuenca, lo que da como resultado un valor que varía de 0 a 1. En esta escala, 1 indica un alto nivel de estrés, mientras que 0 representa la ausencia de estrés. Para evaluar el impacto de cada estresor en la respuesta del ecosistema, se emplea una función de respuesta. Dependiendo de la resiliencia inherente al sistema, el trabajo de Flotemersch et al. (2016) ofrece varios ejemplos de posibles relaciones entre la integridad de la cuenca y los factores estresantes de la misma (ver **Figura 180**). Estos ejemplos incluyen: (a) una respuesta con baja resiliencia; (b) una respuesta lineal negativa; (c) una respuesta umbral, como un 'punto de inflexión'; y (d) una respuesta con alta resiliencia. La línea punteada representa la condición de referencia. De la misma forma, las **Figura 181**, **Figura 183**, **Figura 185** y **Figura 187**, muestran la distribución espacial de los estresores planteados en la **Tabla 56**.

Figura 180. Ejemplos de diferentes respuestas entre la integridad de la cuenca y los factores estresantes de la cuenca



Fuente Flotemersch et al. (2016)

Figura 181. Distribución del estresor de kilómetros de vías

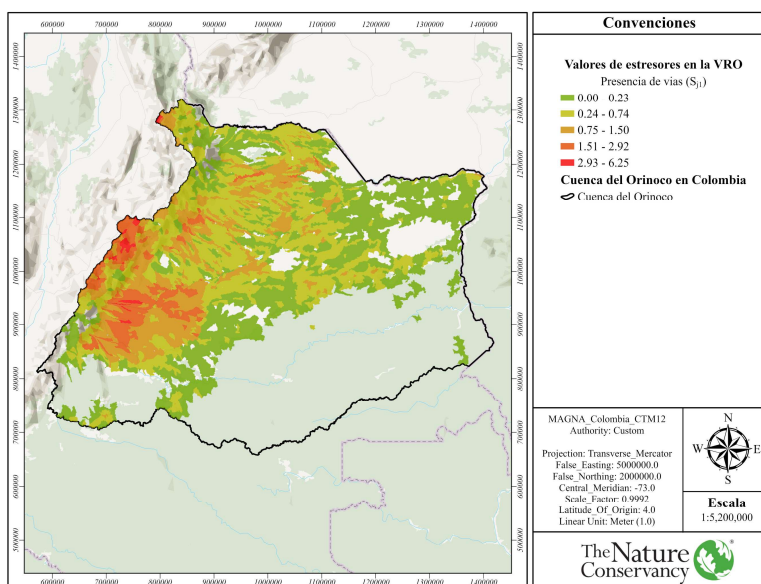


Figura 182. Distribución del estresor de área urbanizada

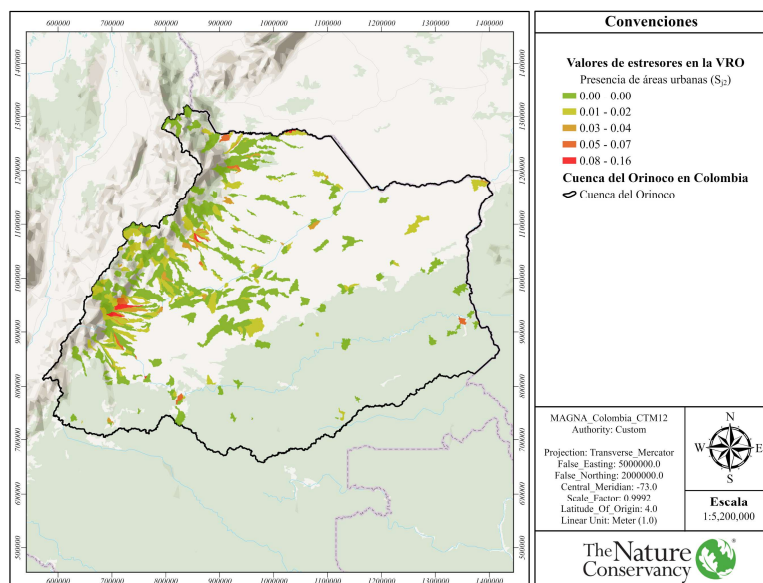


Figura 183. Distribución del estresor de áreas quemadas

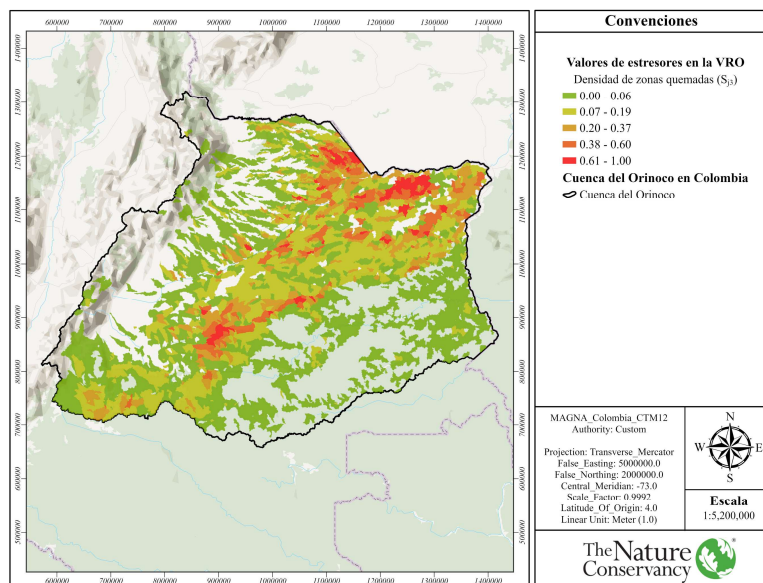


Figura 184. Distribución del estresor de áreas de minería

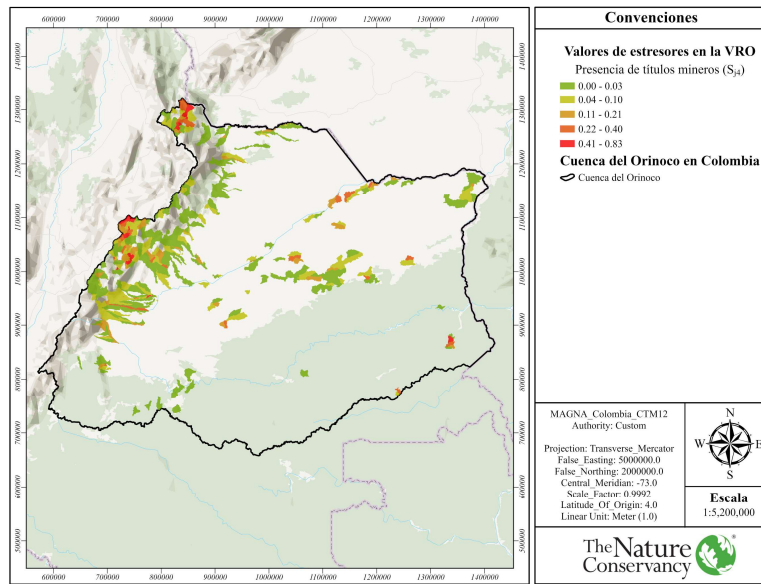


Figura 185. Distribución del estresor de densidad de pozos petroleros

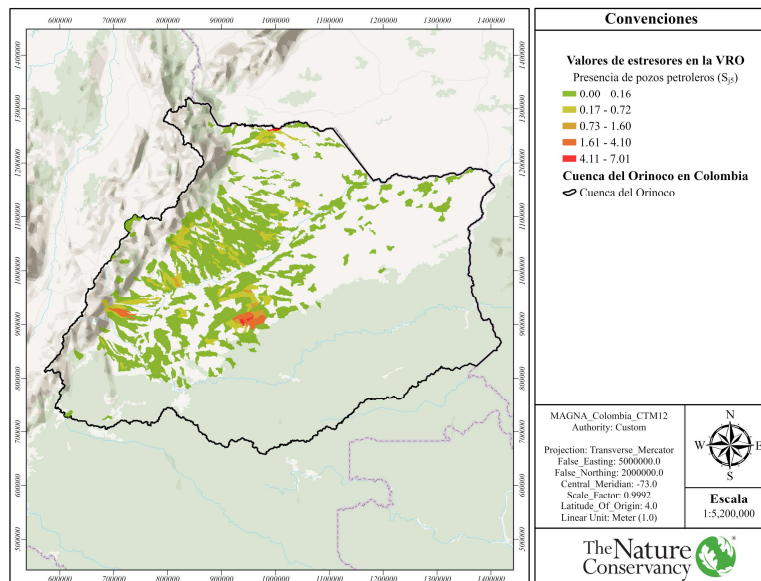


Figura 186. Distribución del estresor de áreas de minería

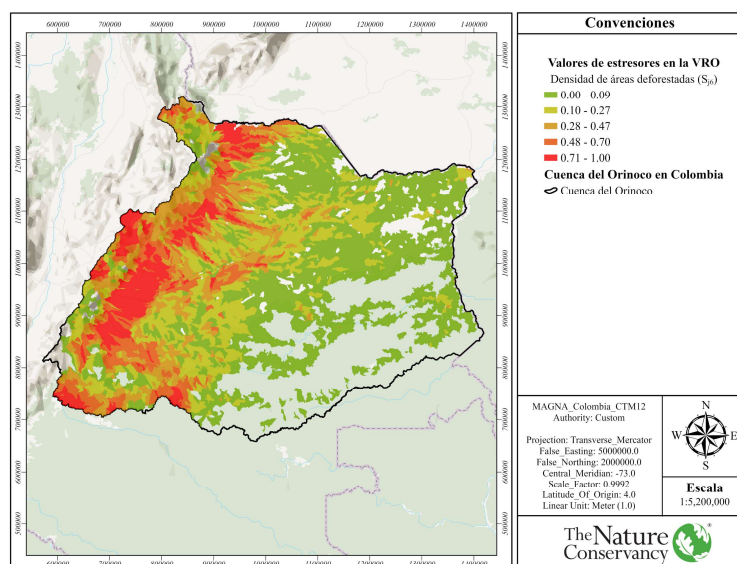
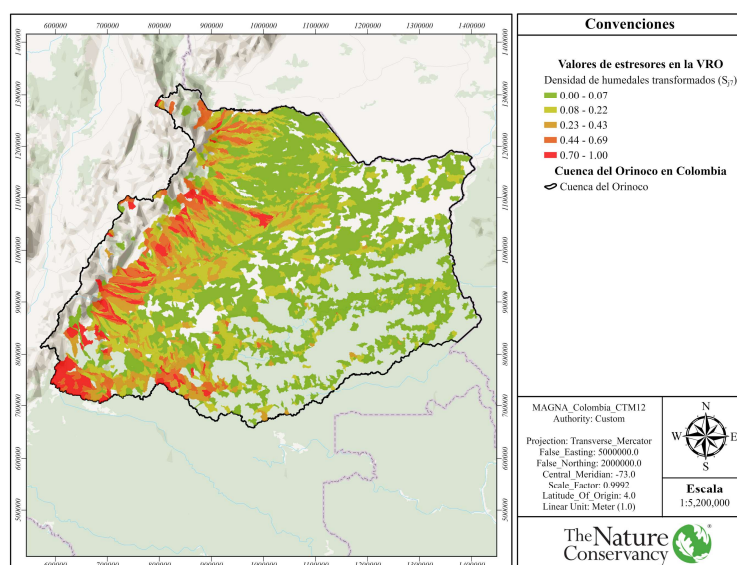


Figura 187. Distribución del estresor de humedales transformados



Para los valores de los estresores obtenidos en las figuras anteriores, se hacen las siguientes precisiones:

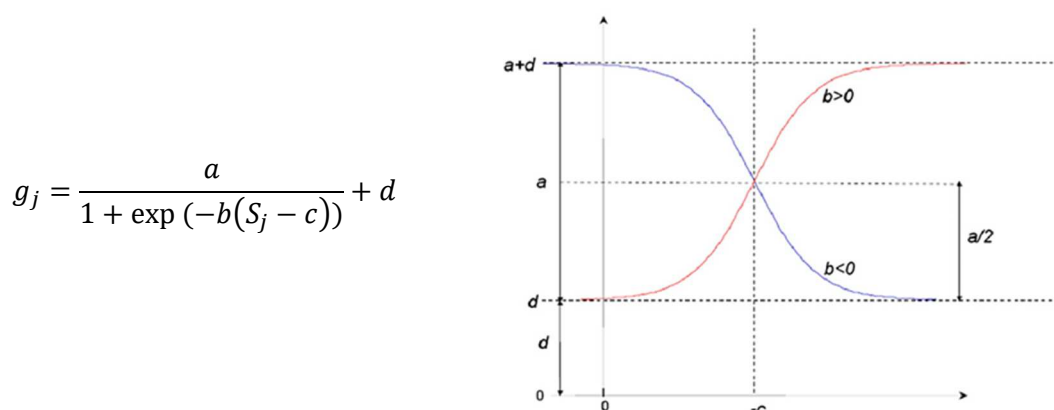
- Los estresores se encuentran normalizados por el área de la UHA sobre la cual se encuentran emplazados, esto con el ánimo de poder aplicar la función logística de forma correcta.
- Para el caso de los estresores S_j asociados a la densidad de áreas de quema y minería, se encuentran similitudes, dado que la normalización se hace a partir de las zonas sobre las cuales se pueden realizar estas actividades (áreas de bosque, pastos, cultivos etc.). Así mismo, es claro que el valor del estresor para estos casos no puede ser mayor a la unidad, es decir, su valor máximo es el área total de la UHA.
- Para el caso del estresor $S_j = 6$ -densidad de áreas deforestadas- se utilizó la cobertura CLC del año 2010 para la capa de bosques, con el ánimo de obtener la trazabilidad temporal de los cambios asociados a la deforestación, sobre las coberturas de la zona.

De la misma forma, para este caso en específico se decidió utilizar una función logística con el ánimo de representar el comportamiento resiliente del sistema, aludiendo a las siguientes suposiciones:

- Al considerar una función logística, se está asumiendo que la cuenca antes de que el estresor alcance su valor medio, tendrá un comportamiento de alta resiliencia. Sin embargo, cuando el estresor pasa de su valor medio, el comportamiento que tendrá la cuenca se volcará hacia uno de baja resiliencia.
- Los humedales transformados son un estresor para el río y la biodiversidad que hay él. Al estar los humedales conectados al río, si existe una pérdida de ellos, los procesos ecosistémicos como el desove de peces, se verían afectados por la transformación, impactando de esta manera la biodiversidad y todos los procesos que dependen de los peces afectados.

Para ello, se plantea una función g_j de la forma:

Figura 188. Comportamiento de la función logística, junto con el significado de sus parámetros



Que indica la integridad asociada al estresor normalizado S_j (ver **Tabla 56**). Por otro lado, a , b , c , y d son parámetros de calibración. Para que el rango g_j se encuentre entre cero y uno, es necesario que:

$$\begin{aligned} a_j &= 1 \\ c_j &= \frac{\max(S_j)}{2} \\ d_j &= 0 \end{aligned}$$

El parámetro b_j queda como un valor de calibración. Básicamente, para determinar el valor de b_j se requiere que:

$$\frac{1}{1 + \exp(-b_j(\min(S_j) + c_j))} \cong 1$$

Se indica que debe ser “aproximadamente igual” a uno, dado que, al despejar b , la función se haría indeterminada para dicho valor por el logaritmo que aparecería en la solución. Por ende, se plantea resolver la igualdad de la forma:

$$\frac{1}{1 + \exp(-b_j(\min(S_j) + c_j))} = 0.999$$

Con lo cual se tiene que:

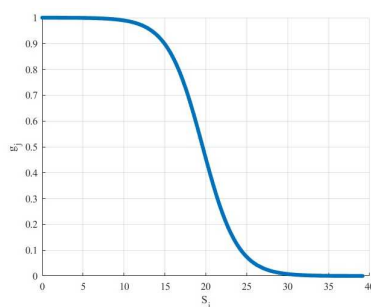
$$b_j = -\frac{1}{\min(S_j) + c_j} \ln\left(\frac{1}{0.999} - 1\right)$$

Al reemplazar los valores de $\min(S_j)$ y c_j en la ecuación anterior, se presentan en la **Tabla 57** los valores de los parámetros para la función de integridad asociada a cada estresor. De la misma forma, la **Figura 189** muestra a manera de ejemplo, el comportamiento de la función de integridad asociada al estresor *presencia de vías*. Se observa que la función logística mantiene su rango entre cero y uno; siendo el comportamiento deseado.

Tabla 57. Valores de los parámetros de la función de integridad

Estresor	a	b	c
Presencia de vías	1	-2.94	3.12
Presencia de zona urbana	1	-18.42	0.5
Presencia de pozos petrolíferos	1	-2.62	3.5
Presencia de títulos mineros	1	-18.42	0.5
Densidad de zonas quemadas	1	-18.42	0.5
Densidad de zonas deforestadas (perdida de área natural)	1	-18.42	0.5
Densidad de humedales transformados	1	-18.42	0.5

Figura 189. Función del estresor "Presencia de vías"



Con todo ello, el índice de integridad de estructura física se presenta en la **Figura 190** aplicando la ecuación de promedio armónico descrita a continuación:

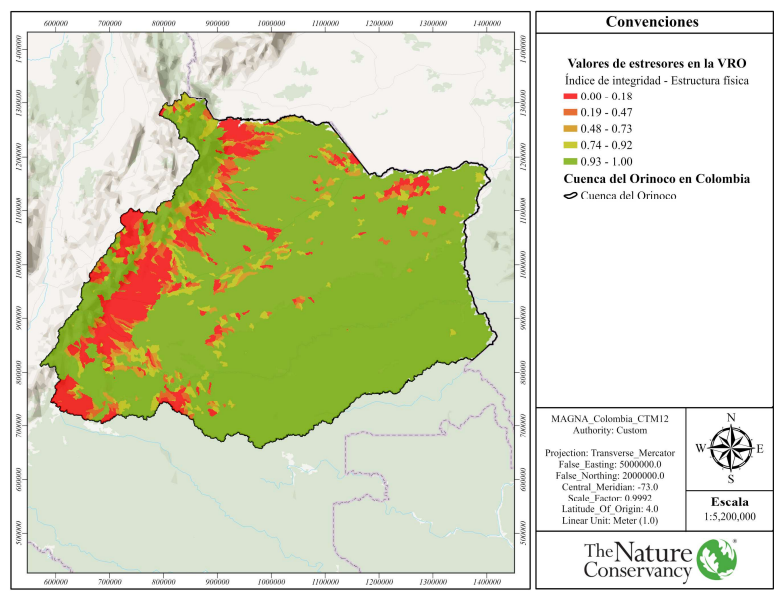
$$Ips = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{\sum_{i=1}^n w_i / g_i}$$

Donde g_j hace referencia al valor del estresor y $w_j = n$, es decir, la cantidad de estresores que están siendo analizados. Cabe resaltar que los valores de w_j se pueden modificar a voluntad, con el ánimo de dar mayor relevancia a un estresor en específico. En cuanto a la integridad física, la **Figura 190** señala valores bajos de integridad principalmente sobre la parte alta de la VRO. Esta situación se origina debido a los factores que han contribuido a una transformación significativa de esta área (estresores). En primer lugar, las actividades agrícolas y ganaderas han desempeñado un papel fundamental en la modificación del paisaje, ya que se han expandido considerablemente a lo largo de los años.

Los bosques que alguna vez dominaron esta área han sido talados para dar paso a la agricultura y la ganadería, lo que ha alterado drásticamente los ecosistemas locales. Los humedales, en particular, han sido gravemente afectados, ya que su degradación está directamente relacionada con la conversión del uso de la tierra en esta región. La pérdida de humedales tiene consecuencias significativas para la

biodiversidad y los servicios ecosistémicos, lo que resalta la importancia de abordar estos problemas para preservar la integridad física de la región.

Figura 190. Índice de integridad de estructura física



9.5 KEA – Conectividad

Los peces de agua dulce representan cerca del 10% del total de especies vertebradas en el mundo. Las anteriores, presenta características únicas como resultado de la historia geológica y de las condiciones medioambientales particulares de la zona donde se ubican. Los análisis sobre dichas características se realizan comúnmente escala local, diferenciando las especies por factores como gradientes de elevación, temperatura, geología de la zona, etc. Esto, presenta una falencia en cuanto al análisis de la interconexión que existe a lo largo río, que contribuye a la formación de esos grupos especiales, en concordancia con el concepto de río continuo (Vannote, 1981). Por consiguiente, la conectividad representa un atributo esencial en los ecosistemas de agua dulce (Herrera-Pérez et al., 2019; Saura et al., 2017). en particular para peces que efectúan movimientos migratorios en la VRO. La información utilizada para la caracterización del KEA de Conectividad, así como los modelos y herramientas de análisis pueden ser consultadas en el **Anexo 5**.

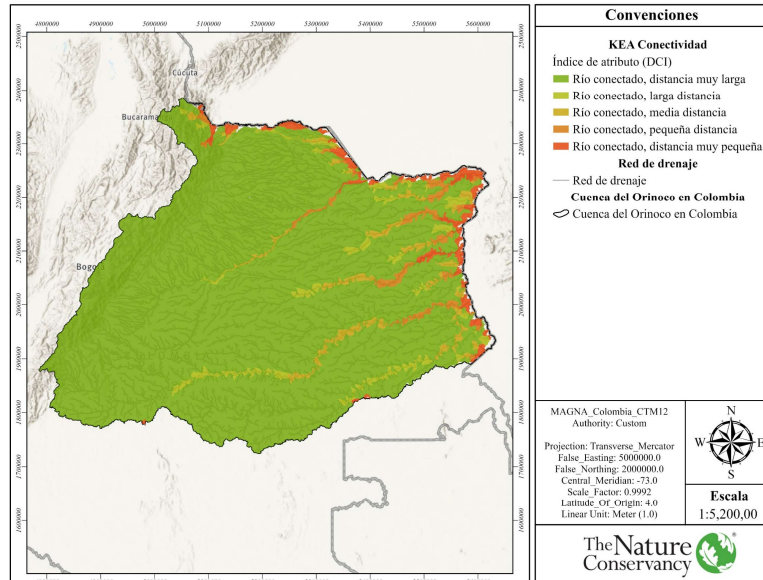
9.5.1 Indicadores de atributo

Como se mencionó en el numeral 7.5, el indicador de atributo para conectividad correspondió al DCI. Para su cálculo, se utiliza el modelo de elevación digital de terreno (DEM), procesado a través de la herramienta de ArcGIS Pro usando ArcHydro Tools. Estimado el indicador, se categoriza como lo estipula la Tabla 58. La distribución espacial de cada indicador categorizado se visualiza en la **Figura 191**.

Tabla 58. Rangos y valores de los índices de atributos de conectividad definidos para la agrupación de grupos de agua dulce en la VRO

KEA	Nombre	Índice de atributo	Rango	Descripción
Conectividad	Índice de conectividad dendrítica (adimensional)	1	0.00 – 0.10	Río conectado, distancia muy larga
		2	0.10 – 0.25	Río conectado, larga distancia
		3	0.25 – 0.50	Río conectado, media distancia
		4	0.50 – 0.75	Río conectado, pequeña distancia
		5	0.75 – 1.00	Río conectado, distancia muy pequeña

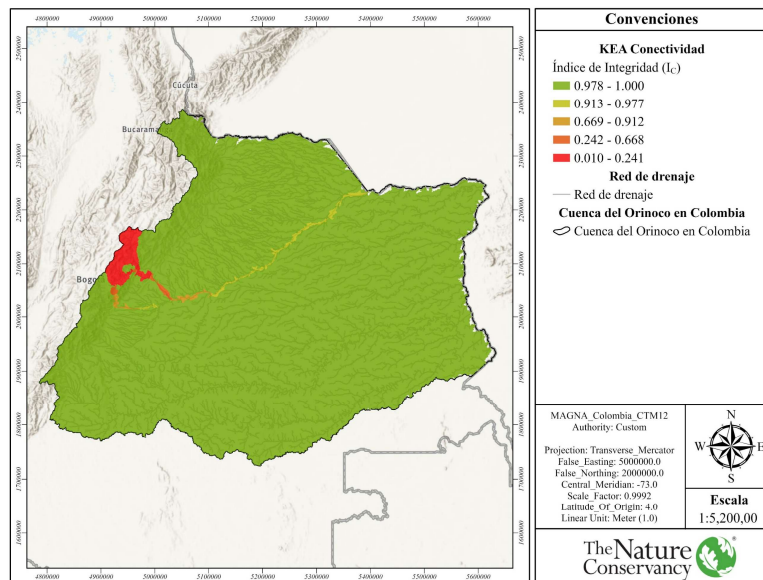
Figura 191. KEA Conectividad – Índice de atributo



9.5.2 Indicadores de integridad

En lo que respecta al indicador de integridad, se utiliza el definido en el numeral 8.4. En la **Figura 192** se observan índices de conectividad bajos sobre las zonas asociadas a los embalses de las centrales hidroeléctricas de Chivor y Guavio, generando alteraciones de conectividad longitudinal de la red fluvial sobre estos sectores. Sin embargo, la integridad de la conectividad se encuentra en su punto más alto en las zonas restantes de la VRO.

Figura 192. KEA Conectividad – Índice de integridad.



10 Grupos de agua dulce

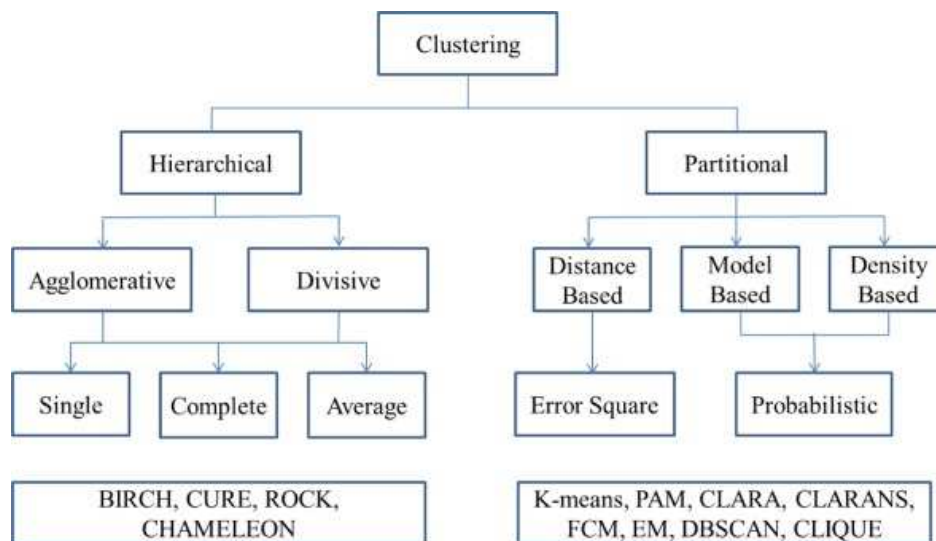
En un contexto más amplio, la identificación y delimitación de grupos de agua dulce desempeña un papel crucial en la gestión y conservación de los ecosistemas acuáticos. Estos grupos son esenciales para comprender la diversidad de hábitats y las particularidades ambientales dentro de una cuenca fluvial. Al agrupar microcuencas con características KEA similares, es posible simplificar la comprensión y el análisis de estos sistemas, facilitando la toma de decisiones en la planificación de la conservación y la gestión de los recursos hídricos.

Este proceso de agrupación se basa en la comparación de indicadores de atributos que se han definido y calculado previamente en los apartados anteriores. Estos indicadores incluyen una variedad de parámetros que abarcan desde la calidad del agua hasta la biodiversidad y la geomorfología del paisaje. Al combinar esta información, se identifican patrones y similitudes en la distribución de los KEA a lo largo de la cuenca, lo que permite definir grupos de agua dulce que representen áreas homogéneas en términos de características ecológicas y ambientales.

Por definición, un grupo de agua dulce es el *conjunto de unidades de planeación, o microcuencas, que comparten características similares en términos de KEA* (Nogales et al., 2023). En este sentido, los grupos de agua dulce pueden ser entendidos como la colección de hábitats existentes dentro de una cuenca. Para identificarlos, se realiza un proceso de agrupación con base en la similitud de los KEA.

De acuerdo con Saxena et al. (2017), existen diferentes enfoques para realizar agrupaciones, en la **Figura 193** se presenta la taxonomía de estos.

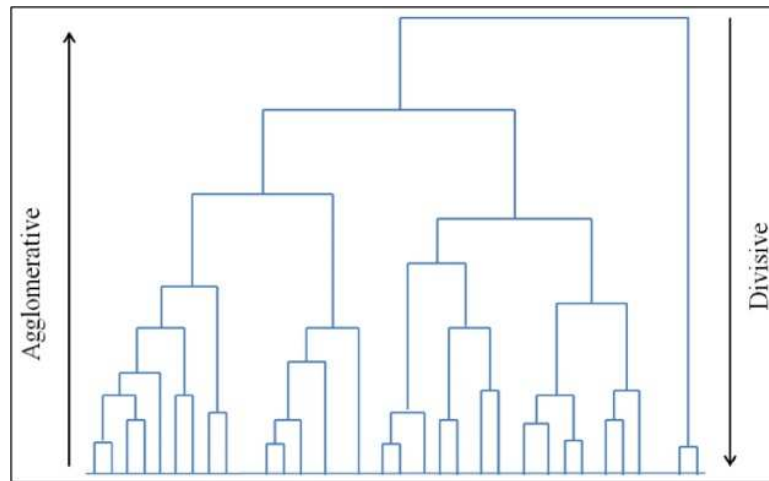
Figura 193. Taxonomía de enfoques de agrupación



Fuente: Saxena et al. (2017)

Para el caso de la cuenca de la VRO, por el tipo de indicadores seleccionado, se utilizó un método de agrupamiento jerárquico aglomerativo (Saxena et al., 2017). Este método sigue el enfoque ascendente, que construye grupos comenzando con un solo objeto y luego fusionando estos grupos atómicos en grupos cada vez más grandes, hasta que todos los objetos finalmente se encuentran en un solo grupo o de otra manera hasta que se cumplan ciertas condiciones de terminación (Saxena et al., 2017) como lo muestra la **Figura 194**.

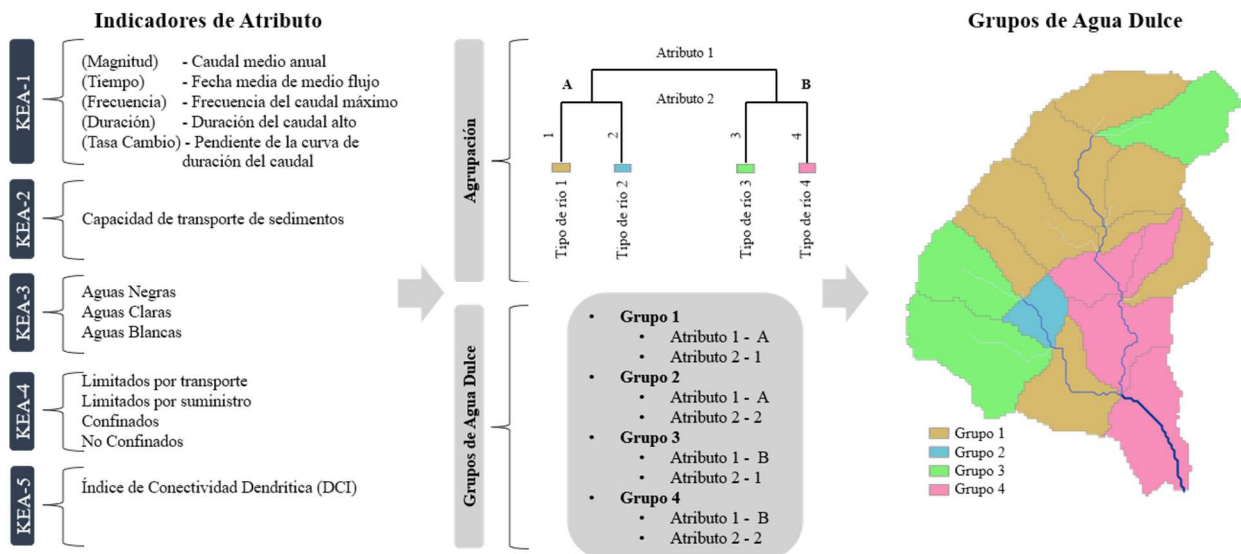
Figura 194. Dendrograma de agrupamiento jerárquico



Fuente: Saxena et al. (2017)

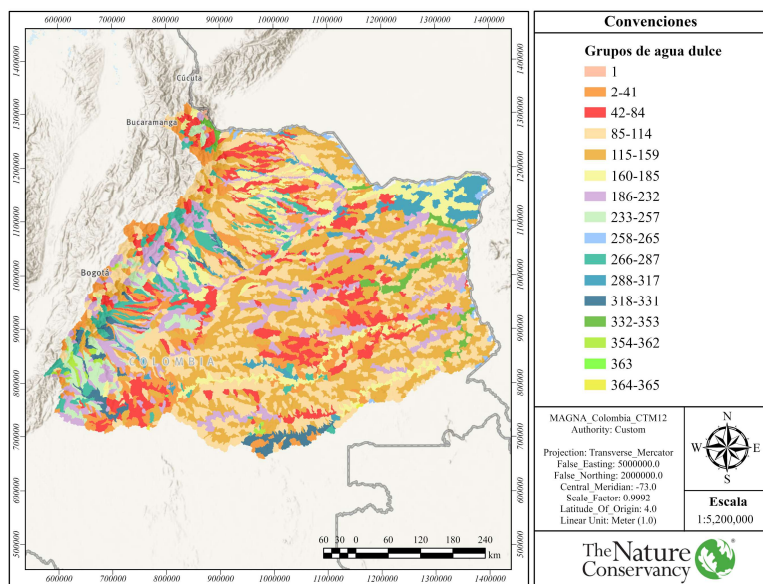
La síntesis del esquema metodológico para la identificación de grupos de agua dulce se presenta en la **Figura 195**.

Figura 195. Esquema metodológico para la identificación de grupos de agua dulce.



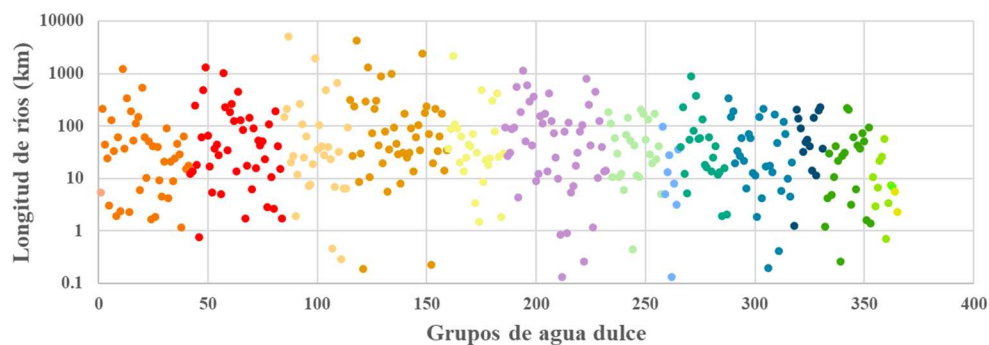
La identificación de un total de 365 grupos de agua dulce en la VRO representa un logro significativo en la comprensión de la diversidad y distribución de estos ecosistemas. Cada uno de estos grupos muestra características ecológicas únicas que reflejan la variabilidad natural de la cuenca. Es importante destacar que estos grupos no están distribuidos de manera uniforme, como se observa en **Figura 196**.

Figura 196. Grupos de agua dulce en la VRO



La **Figura 196** revela que el 26.7% del área de la VRO lo conforman los grupos de agua dulce sobre las cuencas del Río Meta, Tomo y Bitá, lo que indica que comparten características similares en cuanto su régimen hidrológico, transporte de sedimentos, calidad del agua, etc. Esto seguido por la cuenca de los ríos Guainía y Guaviare con un 22.9%. Por otro lado, la **Figura 197** muestra los grupos de agua dulce en función de la cantidad de kilómetros de río.

Figura 197. Longitud de ríos en función de los grupos de agua dulce



La información utilizada para la determinación de los grupos de agua dulce y el resultado obtenido puede ser consultadas en el **Anexo 6**.

11 Rareza

La rareza es una medida de la singularidad o escasez de un determinado grupo de agua dulce dentro de la cuenca de estudio, o de la proporción o superficie ocupada por ese grupo en comparación con el resto de los grupos presentes en la cuenca. En consecuencia, la rareza (I_R) de una microcuenca perteneciente al grupo de agua dulce i se calcula como (Duarte et al., 2016):

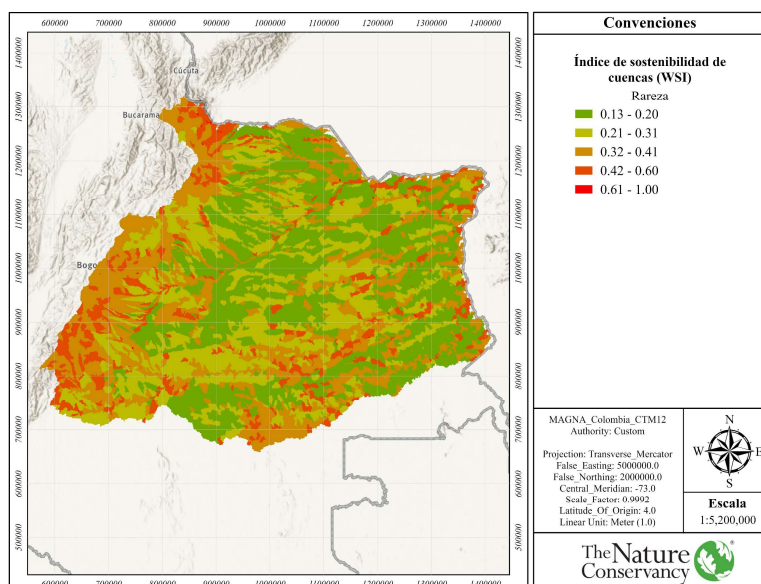
$$I_R = -\ln\left(\frac{a_i}{A}\right)$$

donde a es la superficie total de las microcuencas pertenecientes al grupo de agua dulce i , y A es:

$$A = \sum_{i=1}^{Ng} a_i$$

donde Ng es el número total de grupos de agua dulce. La rareza de los grupos de agua dulce en la VRO se presenta en la **Figura 198**. Los valores altos indican un hábitat único en la cuenca, y los valores bajos indican un hábitat común.

Figura 198. Rareza de los grupos de agua dulce en la VRO.



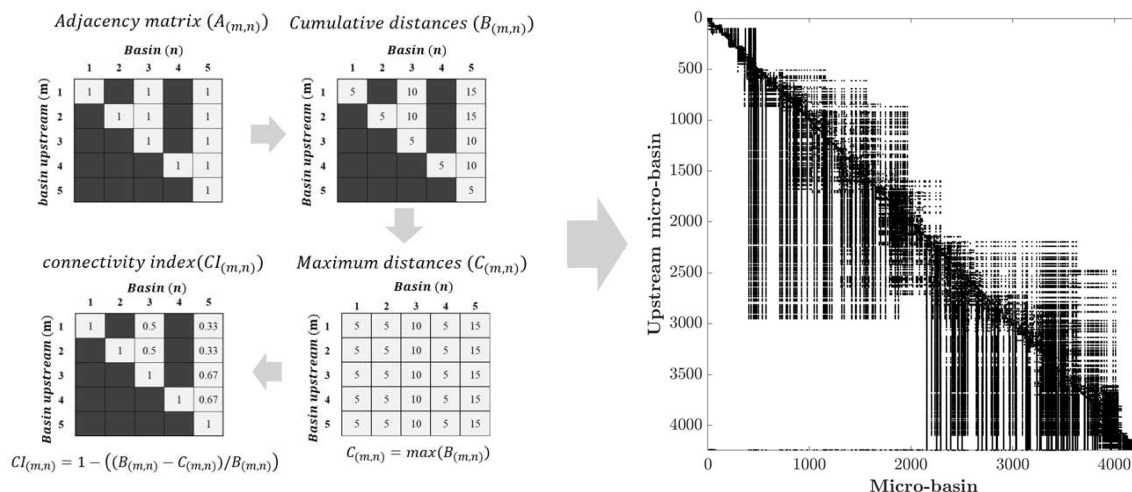
Los valores de rareza en los grupos de agua dulce presentaron patrones notables a lo largo de la VRO. En particular, se observó que los valores más elevados de rareza se registraron en la región alta de la cuenca, en la zona que abarca la cordillera de los Andes. En contraste, los valores más bajos de rareza se concentraron en el área de la parte media y baja de la cuenca. De la misma forma, se encontró que el 16.7% de los grupos identificados se consideran muy raros, lo que implica que poseen una presencia única y distintiva dentro de la cuenca. Estos grupos de agua dulce raros pueden ser de particular interés para la conservación, ya que su singularidad los convierte en elementos valiosos para la biodiversidad de la VRO. La información utilizada para la determinación de la rareza y el resultado obtenido puede ser consultadas en el **Anexo 6**.

12 Conectividad

Para calcular el índice de conectividad, se construyó una matriz de adyacencia (Wohl, 2017) que incluye, para cada unidad, el grado de conectividad definido por la proximidad entre microcuencas, medido utilizando la longitud del cauce principal de cada microcuenca. A modo de ejemplo, considérese que la zona de estudio está segmentada en cinco microcuencas, cada una de las cuales tiene un segmento fluvial con una longitud de 5 km. La matriz de adyacencia direccional aguas arriba de las microcuencas estaría representada por A . Si se calculan las longitudes de los segmentos fluviales desde una microcuenca hasta todas las microcuencas aguas arriba, se consigue la matriz de distancias acumuladas, B . Estimando la distancia máxima para cada microcuenca, se obtiene la matriz de distancias máximas, C . El índice de

conectividad (CI) vendría dado entonces por $1 - ((B_{(m,n)} - C_{(m,n)})/B_{(m,n)})$, donde valores cercanos a 1 indican alta conectividad y valores cercanos a 0 indican baja conectividad. Lo anterior, se muestra en la **Figura 199**, así como también se presenta el resultado de la matriz obtenido para la VRO.

Figura 199. Indicador de conectividad para optimización.



Es esencial comprender que este indicador no tiene la finalidad de emitir una evaluación acerca de si la conectividad en la VRO se encuentra afectada o no. Su principal objetivo es proporcionar una medida del grado de conectividad que una microcuenca específica posee con sus vecinas. Para lograr esto, la estructura del indicador se configura de manera matricial (ver **Figura 199**).

En este sentido, cada microcuenca tendrá tantos valores de conectividad como microcuencas tenga aguas arriba. Por consiguiente, los valores más bajos del indicador corresponderán a microcuencas ubicadas en la parte alta, mientras que valores más altos estarán asociados a microcuencas más cerca de la desembocadura. La razón subyacente para la creación de este indicador radica en asegurar el cumplimiento del criterio establecido en el objetivo de conservación, que implica la necesidad de mantener corredores conectados en el proceso de optimización. La información utilizada para la determinación de la conectividad y el resultado obtenido puede ser consultadas en el **Anexo 6**.

13 Integridad

Tomando en cuenta que consideramos el concepto y el esquema de operativización de la integridad propuesto por Flotemersch et al., (2016), se consideró el índice de integridad global (I) para las microcuencas propuesto por Nogales et al. (2023), el cual se basa en los índices de integridad (I_{ki}) seleccionados para cada KEA ($ki = HR, ST, WQ, PS, C$). Se utilizó un método de agregación geométrica para integrar I_{ki} . Se asignaron valores de pesos iguales (w_{ki}) a todos los índices de integridad por KEA, considerando que cada uno es crucial para la integridad de los ecosistemas de agua dulce. Por lo tanto, a cada I_{ki} se le asignó un peso igual a $1/KI$, donde KI es el número de KEAs. La expresión matemática de I es:

$$I = \prod_{ki=1}^{KI} I_{N_{ki}}^{\left(\frac{1}{w_{ki}}\right)}$$

$$I_{N_{ki}} = (m * I_{ki,r}) + \alpha_{r_{min}} - (m * \min\{I_{ki,r}\})$$

$$m = \frac{\alpha_{r_{max}} - \alpha_{r_{min}}}{\max\{I_{ki,r}\} - \min\{I_{ki,r}\}}$$

En esta ecuación se normaliza cada I_{ki} utilizando un método de escala lineal. Sin embargo, esta normalización se realiza de forma diferenciada por rango (r). Los valores de $\alpha_{r_{min}}$ y $\alpha_{r_{max}}$ corresponden a los límites de escalado utilizados en cada rango: $\min\{I_{ki,r}\}$ representa el umbral mínimo de $I_{ki,r}$ en el rango r , y $\max\{I_{ki,r}\}$ refleja el umbral máximo de I_{ki} en el rango I . Al final, I tiene valores que van de 0 a 1, donde 1 refleja alta integridad y 0 refleja baja integridad. La Tabla 59 presenta los cuatro rangos considerados para el escalado de cada I_{ki} .

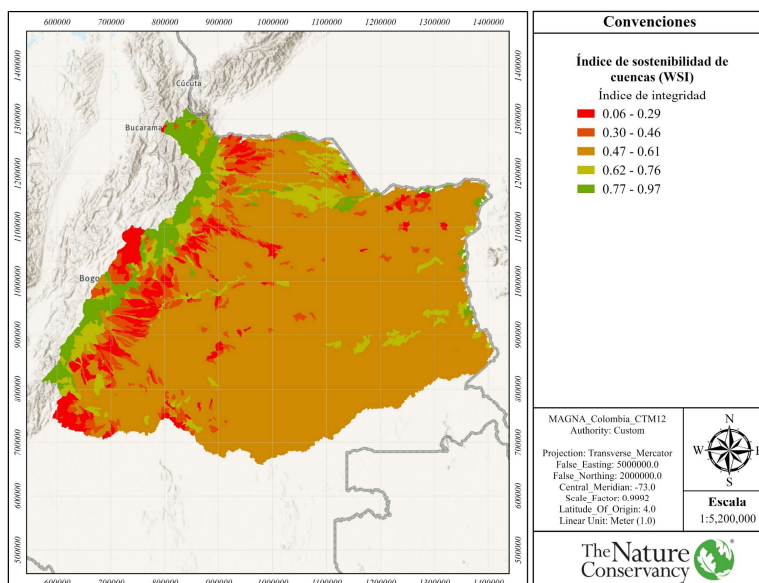
Tabla 59. Rangos de escalado de los índices de integridad.

KEA	Rango 1 $\alpha_{r_{min}} = 0$ $\alpha_{r_{max}} = 0.25$	Rango 2 $\alpha_{r_{min}} = 0.25$ $\alpha_{r_{max}} = 0.5$	Rango 3 $\alpha_{r_{min}} = 0.5$ $\alpha_{r_{max}} = 0.75$	Rango 3 $\alpha_{r_{min}} = 0.75$ $\alpha_{r_{max}} = 1$
Régimen hidrológico	$0.15 > I_{HR}$	$0.15 \geq I_{HR} > 0.1$	$0.1 \geq I_{HR} > 0.05$	$0.05 \geq I_{HR} \geq 0$
Transporte de sedimentos	$0.15 > I_{ST}$	$0.15 \geq I_{ST} > 0.1$	$0.1 \geq I_{ST} > 0.05$	$0.05 \geq I_{ST} \geq 0$
Calidad del agua	$0 \leq I_{WQ} \leq 0.5$	$0.5 < I_{WQ} \leq 0.7$	$0.7 < I_{WQ} \leq 0.9$	$0.9 < I_{WQ} \leq 1$
Estructura física	$0 \leq I_{PS} \leq 0.25$	$0.25 < I_{PS} \leq 0.5$	$0.5 < I_{PS} \leq 0.75$	$0.75 < I_{PS} \leq 1$
Conectividad	$0 \leq I_C \leq 0.25$	$0.25 < I_C \leq 0.5$	$0.5 < I_C \leq 0.75$	$0.75 < I_C \leq 1$

Fuente: Nogales et al. (2023)

Los rangos utilizados corresponden a las categorías del índice de integridad: integridad baja ($0 \leq I < 0.25$), integridad media ($0.25 \leq I < 0.5$), integridad alta ($0.5 \leq I < 0.75$) e integridad muy alta ($0.75 \leq I \leq 1$). La integridad total de la VRO a nivel de microcuencas se presenta en la **Figura 200**.

Figura 200. Integridad total de la VRO a nivel de microcuencas



El resultado obtenido deja ver una variabilidad significativa en la integridad de las microcuencas de la VRO. Un 6.5% de estas microcuencas mostraron valores bajos de integridad, lo que indica una preocupante degradación de sus ecosistemas acuáticos. Estos valores más bajos de integridad se concentraron principalmente en la región alta donde se localizan la mayoría de los centros poblados. Por otro lado, un 76.7% de las microcuencas revelaron una calificación muy alta de integridad, lo que indica una notable preservación y buen estado de los ecosistemas de agua dulce en estas áreas. Al analizar la

integridad en los cauces principales de estos ríos, se observó un patrón disperso, pero con una tendencia al aumento a medida que se incrementa el caudal acumulado. Esto implica que, en general, la integridad tiende a mejorar aguas abajo, lo que es un indicador positivo para la salud de los ecosistemas fluviales de la VRO. La información utilizada para la determinación del indicador de integridad y el resultado obtenido puede ser consultadas en el **Anexo 6**.

14 Importancia

De acuerdo con Nogales et al. (2023), el concepto de importancia está estrechamente relacionado con la cantidad de valores de conservación presentes en una microcuenca. En este sentido, utilizando los valores de conservación definidos en el numeral 5, se construyó un índice de importancia (I_{CV}) que agrupa v subíndices, estimados para cada valor de conservación (CV_v). Este índice oscila entre 0 y 1, donde un valor de 1 representa unidades de gran importancia.

$$I_{CV} = \sum_{v=1}^{Ncv} CV_v$$

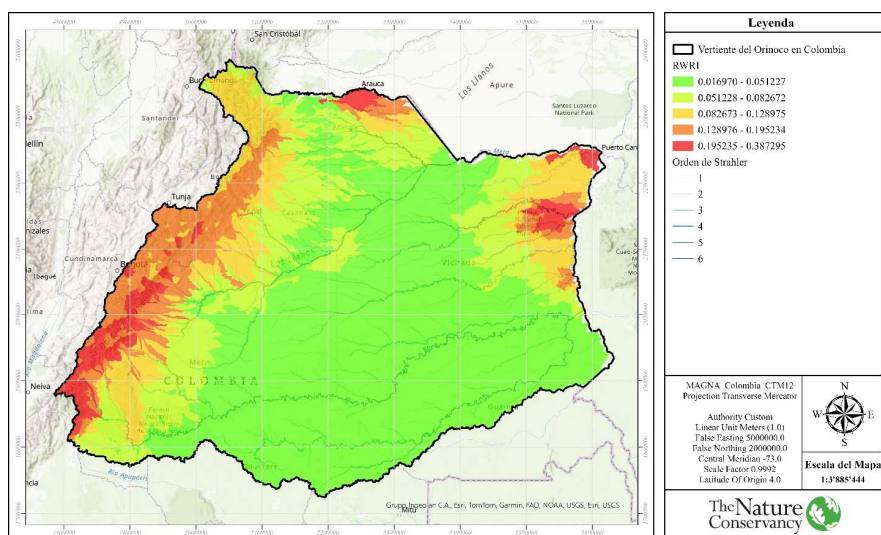
Utilizando los datos de riqueza de las especies peces (numeral 5.1.1), anfibios, reptiles (numeral 5.1.2), aves acuáticas (numeral 5.1.3) y mamíferos acuáticos (numeral 5.1.4) se estimó el índice de riqueza ponderado por rareza ($RWRI$) (Abell et al., 2011; Williams et al., 1996) como un subíndice de importancia que agrupa estos valores. Este índice cuenta el número de especies en una microcuenca y pondera cada especie por la inversa del número de microcuencas que ocupa:

$$RWRI = \sum_{s=1}^{Sp_i} \frac{1}{N_s}$$

$$CV_{RWR} = \left(\frac{RWRI_i}{RWRI_{i,max}} \right)$$

Donde Sp_i es el número de especies en la microcuenca i , N_s es el número total de microcuencas ocupadas por la especie s , $RWRI_i$ es el valor observado de $RWRI$ en la microcuenca i , y $RWRI_{i,max}$ es el valor máximo de $RWRI$ en toda la zona de estudio. En la **Figura 201** se presenta la distribución del índice de riqueza ponderado por rareza en la VRO.

Figura 201. Distribución del índice de riqueza ponderado por rareza en la VRO



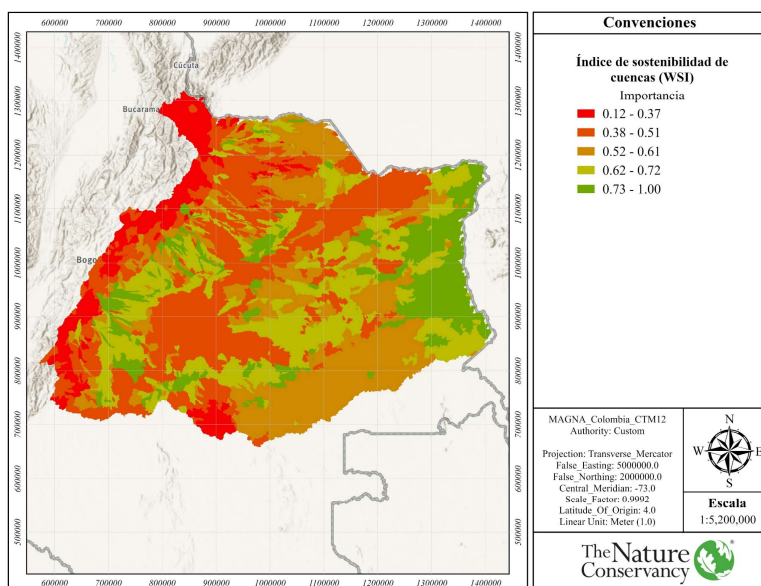
Para los valores de conservación restantes se construyó un subíndice CV , donde $X_{i,w}$ es el valor observado del valor de conservación w en la microcuenca i y $X_{w,max}$ es el valor máximo del valor de conservación w registrado a nivel de microcuenca en toda la zona de estudio:

$$CV_w = \left(\frac{X_{i,w}}{X_{w,max}} \right)$$

Por ejemplo, para los valores de especies amenazadas, megafauna, especies ornamentales y de consumo, se consideran los datos de riqueza para la construcción de este subíndice. Esto mismo aplica para los valores restantes. Al sumar la totalidad de los CV_w y normalizarla por el valor máximo, se tiene la importancia total para cada UHA.

La importancia de las microcuencas en la VRO se presenta en la **Figura 202**. El resultado deja ver que las microcuencas que conforman las desembocaduras de los cauces principales junto con las UHA que hacen referencia a los centros poblados, recibieron los valores más altos de importancia. Esta asignación se justifica plenamente, ya que estos afluentes desempeñan un papel crucial como corredores migratorios.

Figura 202. Importancia de microcuencas en la VRO

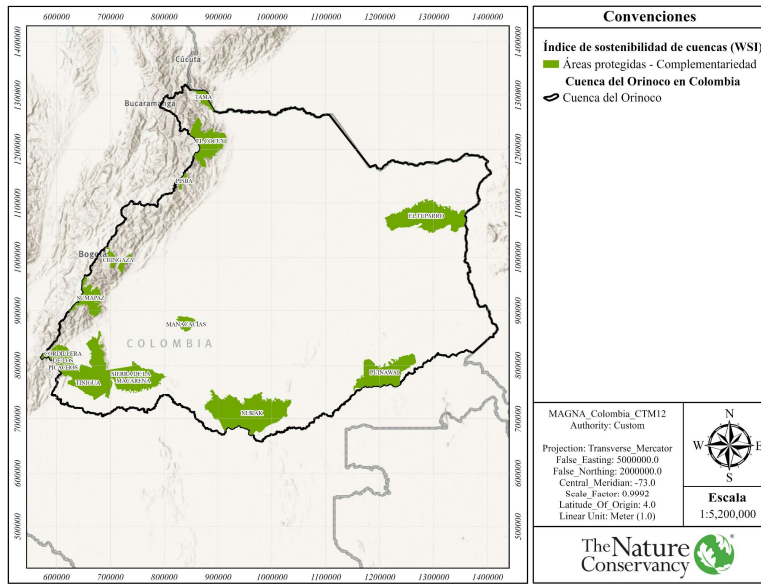


Este indicador de importancia proporciona una visión integral de las áreas clave para la conservación y gestión de la VRO, lo que servirá como una valiosa guía para futuras estrategias de protección y desarrollo sostenible en esta región. La información utilizada para la determinación de la importancia y el resultado obtenido puede ser consultadas en el **Anexo 6**.

15 Complementariedad

La complementariedad es un criterio estrechamente relacionado con la representatividad. De acuerdo con Nogales et al. (2023) esta asegura la inclusión de los grupos de agua dulce que no están dentro de las áreas protegidas en el portafolio de conservación. Así, se busca priorizar aquellos grupos de agua con baja representatividad. Para asegurar la complementariedad en la priorización, se seleccionaron las áreas protegidas provenientes del RUNAP (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2024): PNN Tamá, PNN El Cocuy, PNN Pisba, PNN Chingaza, PNN Sumapáz, PNN Codillera de los Picachos, PNN Tinigua, PNN Serranía de la Macarena, PNN Manacacías, PNN Nukak, PNN Puinawai y PNN El TuparroLa., para un total de 12 áreas de conservación que representan el 10% del área total de la cuenca (ver **Figura 204**). La información utilizada para la determinación de la complementariedad y el resultado obtenido puede ser consultadas en el **Anexo 6**.

Figura 203. Áreas de conservación dentro de la VRO.



16 Representatividad

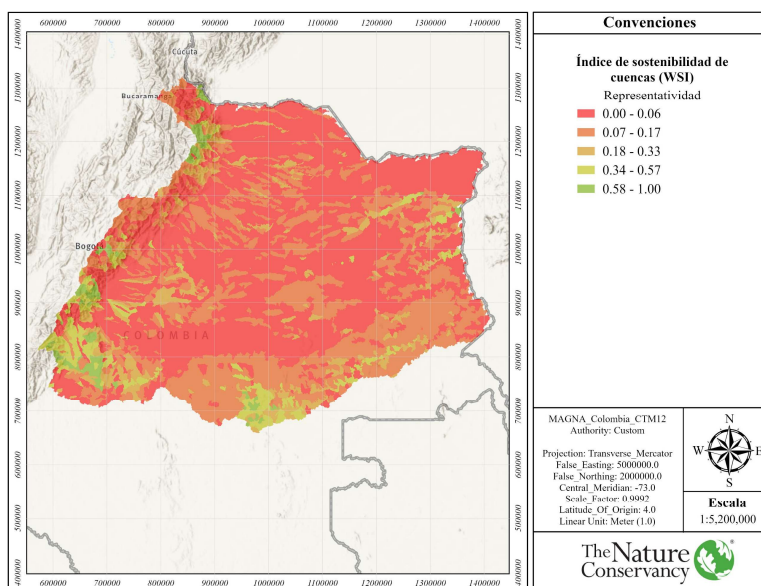
La representatividad es una medida de la presencia de grupos de agua dulce en la red de áreas protegidas existentes en una cuenca (Nogales et al., 2023). En este sentido, se estima la representatividad (I_{Rep}) de la microcuenca i que pertenece al grupo de agua dulce k como:

$$I_{Rep_k} = \frac{1}{A_k} \left(\sum_{k=1}^I a_{k,w} \right)$$

$$A_k = \sum_{k=1}^I a_k$$

Donde $a_{k,w}$ es la superficie de las microcuencas pertenecientes al grupo de agua dulce k y contenidas dentro de un área de conservación existente k , y a_k es la superficie de todas las microcuencas pertenecientes al grupo de agua dulce k (Duarte et al., 2016). La **Figura 204** presenta el índice de representatividad total de la VRO.

Figura 204. Representatividad total a nivel de microcuencas para la VRO



La información utilizada para la determinación de la representatividad y el resultado obtenido puede ser consultadas en el **Anexo 6**.

17 Oportunidades de conservación (Portafolio)

A partir de la propuesta de Riato et al. (2020) se definieron las oportunidades de conservación, incluyendo protección, restauración y gestión sostenible, utilizando el índice de integridad a nivel de microcuenca y subcuenca. Se tomaron los valores de integridad a nivel de microcuenca y se llevaron a nivel de subcuenca para de esta manera construir diagrama de dispersión 2D (ambos índices deben escalarse entre 0 y 1, donde 0 representa baja integridad y 1 representa alta integridad).

El diagrama de dispersión 2D para definición de oportunidades de conservación se presenta en la **Figura 205**. La distribución espacial de las oportunidades de conservación en la VRO se presenta en la **Figura 206**.

Figura 205. Diagrama de dispersión 2D para definición de oportunidades de conservación

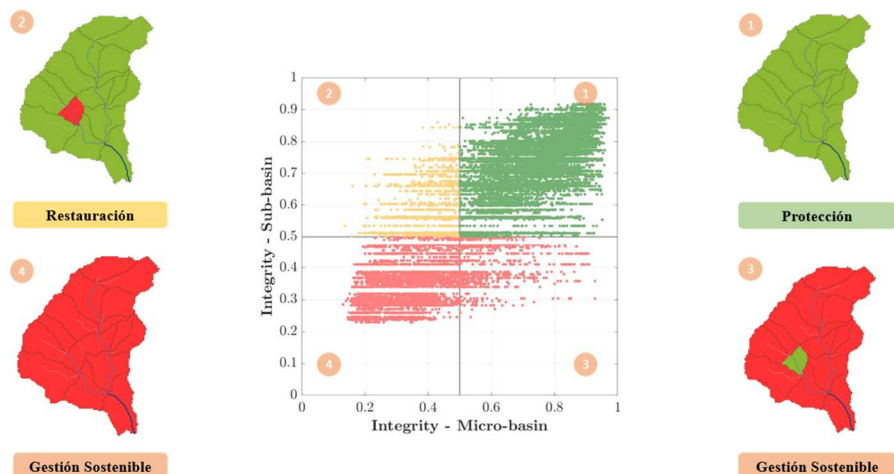
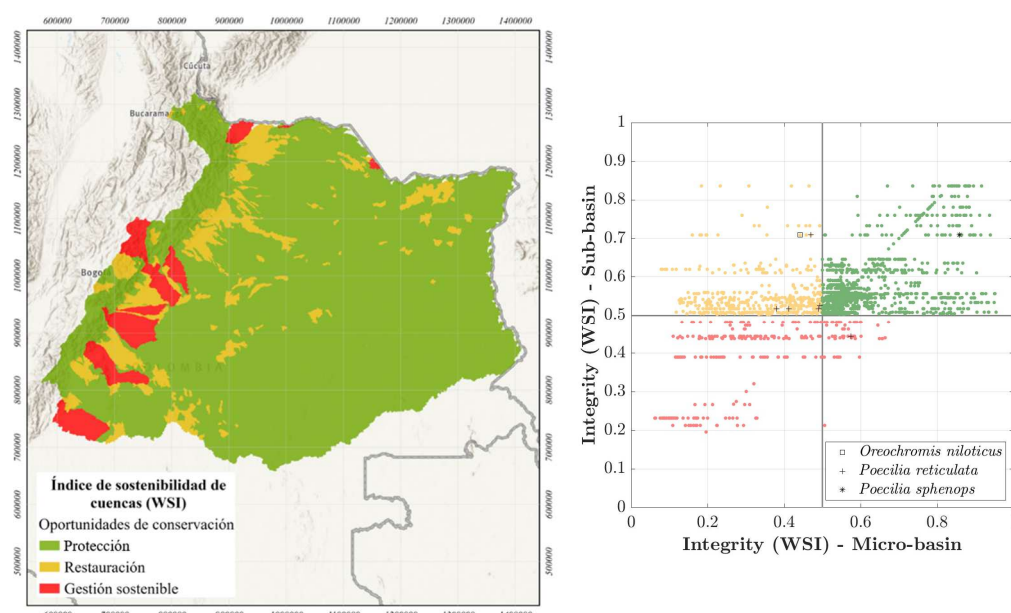


Figura 206. Oportunidades de conservación de la VRO



El análisis del diagrama de dispersión 2D proporciona información valiosa sobre las estrategias óptimas para conservar las microcuencas en la VRO. Este análisis revela que la mejor oportunidad para conservar aproximadamente el 82.9% de las cuencas se encuentra a través de acciones de conservación. Esta estrategia de protección se distribuye principalmente de manera continua en las zonas media y baja de la cuenca, y su aplicación es crucial para mantener la integridad de estos ecosistemas. Por otro lado, se identifica que la restauración del entorno natural es una estrategia viable en aproximadamente el 10.8% de la cuenca, especialmente en las áreas de alta montaña, piedemonte y zonas de media-altura.

Siguiendo con estos resultados, se destaca que la gestión sostenible de los recursos debería aplicarse en el 6.2% de la VRO. Esta estrategia de gestión sostenible muestra un patrón principalmente continuo y está más presente en las zonas de piedemonte de la cuenca.

Adicionalmente, al cotejar las oportunidades de conservación con los registros de presencia de especies de peces exóticas invasoras en la VRO³, se observa que estas especies están presentes en microcuencas con oportunidades de restauración y gestión sostenible. La presencia de especies invasoras tiene implicaciones significativas para los procesos de restauración, tanto desde una perspectiva ecológica como social. Acciones como la erradicación y el control pueden incluir la captura y consumo de estas especies por parte de la comunidad, generando beneficios sociales, económicos y ambientales (Nogales et al., 2023).

En línea con lo anterior, una de las oportunidades que de mejora que se reafirma es la incorporación de un índice que resalte las interacciones bióticas, ampliando así las medidas específicas relacionadas con estas interacciones. Es importante señalar que los resultados respaldan la idea de que las áreas previamente designadas para la protección ya han sido identificadas como las de mayor relevancia para la conservación, lo que confirma su importancia crítica en la estrategia de gestión de la cuenca. La información utilizada para la determinación de las oportunidades de conservación y el resultado obtenido puede ser consultadas en el **Anexo 6**.

³ El nombre de las especies se extraen del Plan Nacional para la Prevención, el Control y Manejo de las ESPECIES INTRODUCIDAS, TRASPLANTADAS E INVASORAS, mientras que los datos de presencia se extraen de GBIF (<https://www.gbif.org/>).

18 Portafolio de conservación bajo esquema de priorización

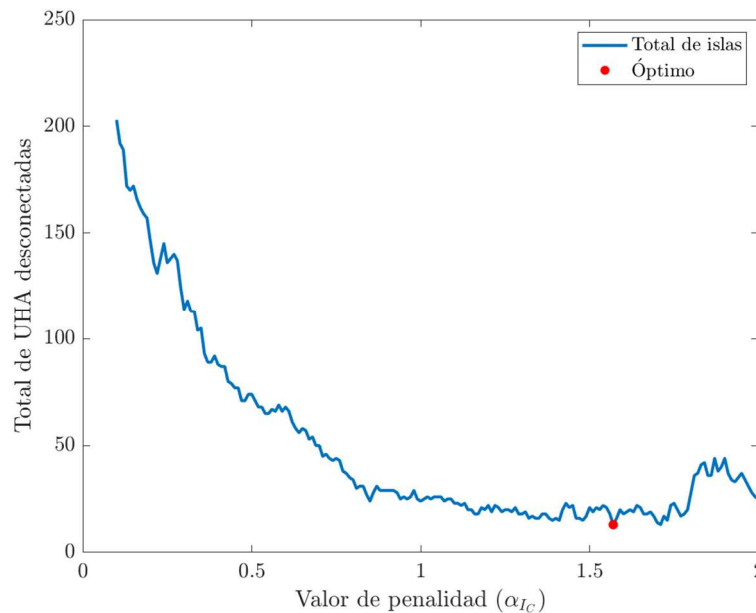
Las áreas prioritarias en la VRO corresponden a la red de microcuencas que maximiza los valores de conservación (importancia) (I_{CV}) a la vez que i) promueve la mayor representatividad de grupos de agua dulce, ii) conecta el mayor número de grupos de agua dulce raros, iii) incluye microcuencas con alta integridad, y iv) genera corredores de microcuencas conectadas.

Como se detalló en el numeral 1, las áreas prioritarias para la VRO, surge de un proceso de optimización matemática, donde la función objetivo (Of) es:

$$Of = \left(\sum_{UHA} I_{CV} \right) - \left(\alpha_{I_{WSI}} \sum_{\text{Integrity penalty}} I_{WSI} \right) + \left(\alpha_{I_R} \sum_{\text{Rarity penalty}} I_R \right) + \left(\alpha_{I_{Rep}} \sum_{\text{Representativity penalty}} I_{Rep} \right) - \left(\alpha_{I_C} \sum_{\text{Connectivity penalty}} I_C \right)$$

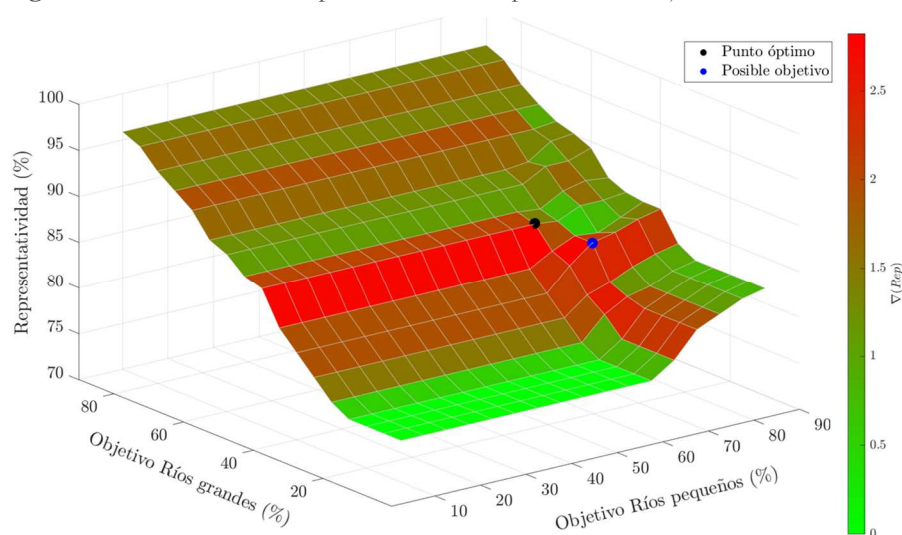
Los valores de α_i son coeficientes de penalización. En este sentido, con el fin de generar corredores conectados se evaluó la variación del coeficiente de penalidad del índice de conectividad α_{I_C} , con respecto a la cantidad de unidades UHA que permanecen desconectadas en la solución, hasta encontrar el punto óptimo de la función. Como se observa en la **Figura 207**, el valor óptimo encontrado para α_{I_C} es 1.57. Con esto se obliga al modelo de optimización a mantener los corredores conectados de forma objetiva.

Figura 207. Variación de la cantidad de islas en función del parámetro de penalidad del índice de conectividad.



Ahora bien, con el propósito de evaluar los objetivos de conservación que permitan la maximización de la representatividad de la VRO, se hace una evaluación de las diferentes métricas u objetivos de conservación planteados para ríos grandes y pequeños. Para ello, se generaron 361 combinaciones, variando los porcentajes para ambos tipos de ríos en un rango entre 10% y 100%, manteniendo como valor de penalidad de la conectividad, el óptimo encontrado igual a 1.57. Finalmente, se evaluó el comportamiento de la representatividad, en función de los objetivos de conservación es un gráfico de superficie, como lo indica la **Figura 208**.

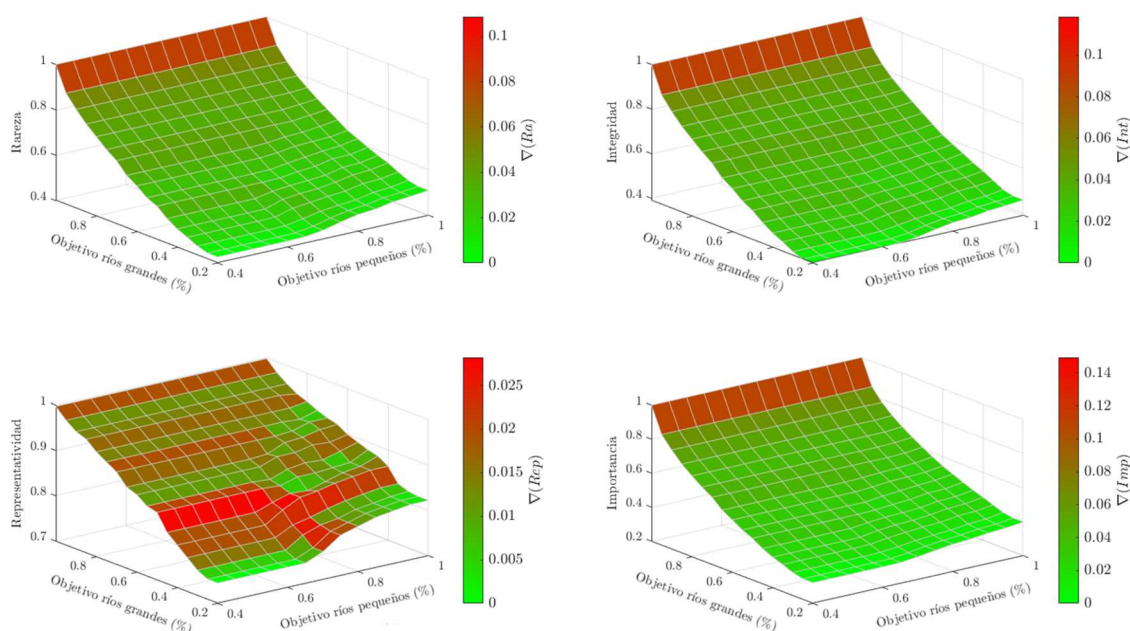
Figura 208. Variación de la representatividad respecto de los objetivos de conservación.



Según lo anterior, se considera el punto óptimo al valor asociado al objetivo de conservar el 70% de los ríos grandes y 50% de los ríos pequeños. Esto dado a que la superficie de la **Figura 208** indica que la variación o gradiente de la representatividad $\nabla(rep)$ es máxima, con lo cual es posible lograr la meta propuesta más rápidamente. Así mismo, se logra identificar la combinación con proporción 75% - 40% para ríos grandes y pequeños respectivamente (punto azul de la **Figura 208**). Sin embargo, no se elige esta como objetivo de conservación dado que el valor de representatividad que se logra es del 83.8%.

Finalmente, el procedimiento anterior se realiza para los demás indicadores de rareza, importancia, e integridad, como lo muestra la **Figura 209**.

Figura 209. Variación de los índices de representatividad, rareza, importancia e integridad en función de los objetivos de conservación



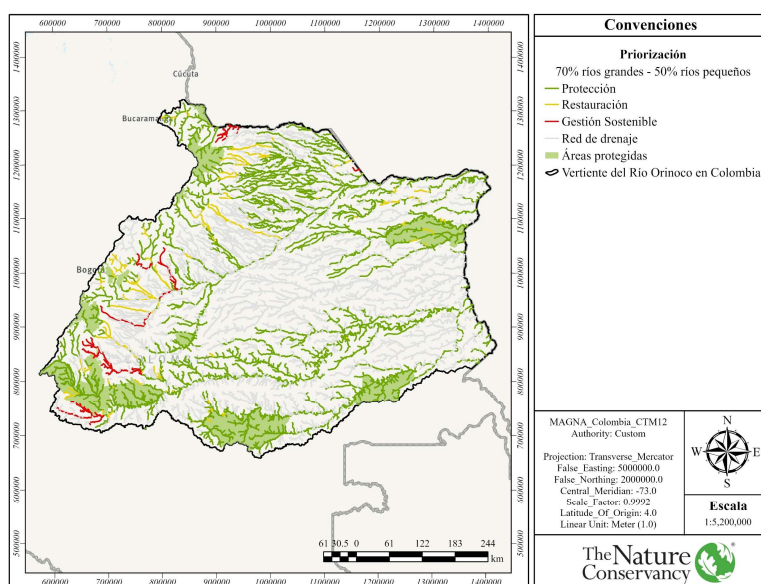
Se observa que los demás indicadores no son sensibles a cambios en los objetivos de conservación, después de sobrepasar umbrales para las metas superiores al 80%. Esto corrobora que a través de la

maximización de la representatividad se logran obtener el umbral mínimo u óptimo de tramos priorizados, generando a su vez cambios en los indicadores de conservación de la cuenca de forma más eficiente.

En este orden de ideas, se considera como meta de conservación para la VRO, la combinación de 70% de los ríos grandes y 50% de los ríos pequeños. Ahora bien, el portafolio de conservación para la VRO está compuesto por las áreas prioritarias resultantes del proceso de optimización y las oportunidades de conservación identificadas a partir del diagrama de dispersión 2D propuesto por Riato et al. (2020). Por tanto, la distribución espacial de las unidades priorizadas con sus correspondientes oportunidades de conservación se presenta en la **Figura 210**.

El portafolio de conservación para ecosistema de agua dulce obtenido para la VRO indica que para alcanzar un 85% de la representatividad de los grupos de agua dulce identificados, es necesario tomar acciones de conservación en el 70% de los ríos grandes y 50% de los ríos pequeños que se muestran en la **Figura 210**. De acuerdo con el resultado obtenido, se debería realizar acciones de conservación en 25,585.9 km de ríos, de restauración en 2,502.3 km de ríos y de gestión sostenible en 1,380.4 km de ríos.

Figura 210. Portafolio de conservación de la VRO bajo esquema de priorización



El análisis indica que el 87% del portafolio priorizado se enfoca en la protección, lo que demuestra que, a pesar de las amenazas presentes, los ecosistemas de agua dulce de la VRO mantienen una alta integridad en términos de sus atributos ecológicos clave. No obstante, algunos ríos están significativamente presionados por actividades antropogénicas, lo que hace que la gestión sostenible sea la mejor estrategia de conservación. Tal es el caso del río Losada, donde la deforestación ha impactado considerablemente estos ecosistemas. En los departamentos de Meta, Caquetá, Guaviare y Putumayo, se pierden aproximadamente 200,000 hectáreas de bosque anualmente debido a la ganadería extensiva, la construcción de infraestructuras viales y la extracción ilícita de minerales.

En los ríos del piedemonte de la VRO, específicamente en el departamento del Meta, las mejores oportunidades de conservación incluyen tanto la gestión sostenible como la restauración. Esto se debe a que principalmente en estas zonas se concentra una parte de los monocultivos de palma de aceite y soya, así como de las actividades silvopastoriles. Adicionalmente, la exploración y explotación de petróleo y

gas en los departamentos de Meta y Casanare han contribuido a la degradación ambiental, afectando aproximadamente 150,000 hectáreas de suelo y cuerpos de agua en estas áreas.

El portafolio de conservación es coherente con los criterios de selección establecidos y se alinea con otros estudios de conservación, como el realizado por Lasso et al. (2017), que se enfoca principalmente en especies. Además, el portafolio priorizado destaca por su capacidad para establecer una alta conectividad entre las microcuencas, creando corredores efectivos y fortaleciendo la conexión entre las áreas protegidas existentes. Esta conectividad es esencial para mantener la integridad ecológica y funcional de los ecosistemas, facilitando el flujo genético y el movimiento de especies.

El portafolio de conservación para la VRO no solo identifica áreas prioritarias para la conservación y restauración, sino que también proporciona un marco integral para la gestión sostenible de los recursos hídricos. Al garantizar la protección de los ríos grandes y pequeños y la restauración de áreas degradadas, se puede asegurar la persistencia de la biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas de agua dulce en la VRO, contribuyendo significativamente a los objetivos de conservación a largo plazo.

La información utilizada para la determinación del portafolio de conservación y el resultado obtenido puede ser consultadas en el **Anexo 6**.

19 Conclusiones

La VRO enfrenta una serie de amenazas que ponen en peligro su integridad ecológica. Entre las amenazas más significativas se encuentran la expansión de la frontera agrícola, impulsada por la ley ZIDRES, que ha clasificado aproximadamente el 70% del área de la VRO como apta para el desarrollo agrícola, especialmente para la producción de palma de aceite, soya y actividades silvopastoriles. Esta expansión ha provocado una deforestación considerable, concentrándose el 70% en los departamentos de Meta, Caquetá, Guaviare y Putumayo, resultando en la pérdida de más de 200,000 hectáreas anualmente debido a la ganadería extensiva, la construcción de infraestructuras viales y la extracción ilícita de minerales. Adicionalmente, la exploración y explotación de petróleo y gas en los departamentos de Meta y Casanare han contribuido a la degradación ambiental, afectando tanto el suelo como los cuerpos de agua. La contaminación de fuentes hídricas por actividades agrícolas, ganaderas y mineras, que liberan grandes cantidades de agroquímicos y metales pesados, junto con los efectos del cambio climático que alteran el régimen hidrológico, incrementan las sequías extremas e inundaciones, afectando tanto la biodiversidad como las actividades productivas de la región.

Los valores de conservación en la VRO son de vital importancia debido a la alta biodiversidad y la variedad de ecosistemas presentes. La región alberga numerosas especies endémicas y en peligro de extinción, lo que subraya la necesidad de protección y manejo adecuado de los recursos naturales. Los ecosistemas acuáticos de la VRO desempeñan un papel crucial en la regulación del ciclo hidrológico, la mitigación de inundaciones y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, como el suministro de agua limpia y el mantenimiento de la calidad del suelo. La diversidad biológica y los servicios ecosistémicos que ofrece la VRO no solo son vitales para la salud ambiental, sino también para las comunidades locales que dependen de estos recursos para su subsistencia y bienestar. Por lo tanto, la conservación de estos valores es fundamental para asegurar la sostenibilidad ecológica y económica de la región.

El estudio ha demostrado la efectividad de una metodología integral para la obtención de un portafolio de conservación en ecosistemas de agua dulce en la VRO. La metodología propuesta por Nogales et al. (2023) se ha mostrado robusta y flexible, permitiendo su potencial aplicación en otras cuencas hidrográficas del país. Este enfoque facilita la planificación y ejecución de estrategias de conservación en diversas regiones, asegurando la protección de ecosistemas críticos. La integración de seis criterios

fundamentales para la priorización (representatividad, integridad, importancia, rareza, complementariedad y conectividad), agrupados a través de un índice de integridad total, ha sido clave para la identificación de zonas prioritarias en la VRO. No solo se han identificado áreas para la conservación (82.9% del área de estudio), sino también para la restauración (10.8%) y la gestión sostenible (6.3%). Este enfoque multiescalar ha permitido evaluar la capacidad de la cuenca y determinar las mejores oportunidades de conservación, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones.

El portafolio de conservación priorizado ha sido diseñado para alcanzar la meta de proteger el 70% de los ríos grandes y el 50% de los ríos pequeños, logrando así una representatividad del 85%. Este logro subraya la capacidad del enfoque metodológico para identificar y priorizar áreas que no solo son ecológicamente significativas, sino también estratégicamente viables para la conservación a largo plazo.

El análisis detallado de los KEA ha proporcionado una comprensión completa de las amenazas y presiones que afectan a los ecosistemas de agua dulce en la VRO. El índice de integridad, al considerar los KEA como el régimen hidrológico, flujo de sedimentos, calidad del agua, estructura física y conectividad, ofrece una poderosa herramienta para el ordenamiento del territorio. Los modelos utilizados permiten visualizar los impactos acumulativos de las amenazas a los ecosistemas de agua dulce, facilitando la priorización de acciones de conservación. Este análisis es esencial para diseñar y evaluar estrategias de manejo y restauración efectivas. Los instrumentos de ordenamiento territorial deben integrar estos modelos para planificar de manera efectiva el uso del suelo y la gestión de los recursos hídricos.

La inclusión de indicadores de conectividad y representatividad es fundamental para garantizar la funcionalidad ecológica a largo plazo de las áreas seleccionadas. El portafolio de conservación generado destaca por su capacidad para mantener la conectividad entre microcuencas y áreas protegidas existentes, creando corredores efectivos y asegurando la integridad de los ecosistemas. Este enfoque es crucial para la conservación de la biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos. Las políticas de ordenamiento territorial deben priorizar la creación y mantenimiento de corredores ecológicos, asegurando la conectividad entre áreas protegidas para facilitar el movimiento de especies y la resiliencia ecológica.

La metodología utilizada no solo proporciona un marco para la planificación de la conservación, sino que también puede servir como una herramienta práctica para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos y del territorio. Su aplicación puede apoyar a las autoridades locales y nacionales en la implementación de políticas ambientales efectivas y en la gestión sostenible de los recursos naturales. La replicabilidad y flexibilidad de la metodología sugieren que podría aplicarse en otras cuencas hidrográficas y regiones, adaptándose a diferentes contextos ecológicos y sociales. Se debe fomentar la implementación de esta metodología en otras regiones y cuencas hidrográficas, proporcionando directrices claras y recursos para su adaptación y aplicación. Además, es esencial integrar esta metodología en las políticas públicas y los instrumentos de ordenamiento territorial a nivel nacional y regional.

En resumen, este estudio subraya la importancia de una planificación sistemática y basada en evidencia para la conservación de los ecosistemas de agua dulce. La metodología integral aplicada en la cuenca del VRO no solo contribuye a la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, sino que también sienta las bases para su aplicación en otras regiones, promoviendo la sostenibilidad y resiliencia de los ecosistemas acuáticos.

20 Referencias

- Abell, R., Thieme, M., Ricketts, T.H., Olwero, N., Ng, R., Petry, P., Dinerstein, E., Revenga, C., Hoekstra, J., 2011. Concordance of freshwater and terrestrial biodiversity. *Conserv Lett* 4, 127–136. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2010.00153.x>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2023. Informe de recursos y reservas con corte diciembre de 2022, insumo para la Transición Energética Justa en Colombia. Bogotá.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2022. Pozos petroleros [WWW Document]. Agencia Nacional de Tierras. URL <https://geovisor.anh.gov.co/tierras/> (accessed 5.10.22).
- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), Instituto Humbolt, 2022. Formulación del marco conceptual y metodológico para la valoración integral de los servicios ecosistémicos en los procesos de licenciamiento ambiental.
- Agencia Nacional de Tierras, 2023. Zonas de reservas campesinas, Resguardos Indígenas y consejos comunitarios [WWW Document]. Agencia Nacional de Tierras. URL <https://data-agenciadetierras.opendata.arcgis.com/> (accessed 2.1.23).
- Aguilar Londoño, T., González Castrillón, E.M., Bustamante, P.E., Estrada, H., Rodríguez López, J.F., 2021. Exploración minera en Colombia, el primer paso hacia la transformación minera. Bogotá.
- Ahilan, S., O'Sullivan, J.J., Bruen, M., Brauders, N., Healy, D., 2013. Bankfull discharge and recurrence intervals in Irish rivers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management* 166, 381–393. <https://doi.org/10.1680/wama.11.00078>
- Akhtar, N., Ishak, M.I.S., Ahmad, M.I., Umar, K., Md Yusuff, M.S., Anees, M.T., Qadir, A., Ali Almanasir, Y.K., 2021. Modification of the Water Quality Index (WQI) Process for Simple Calculation Using the Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Method: A Review. *Water (Basel)* 13, 905. <https://doi.org/10.3390/w13070905>
- Alley, W.M., 1984. On the Treatment of Evapotranspiration, Soil Moisture Accounting, and Aquifer Recharge in Monthly Water Balance Models. *Water Resources Research*.
- Ando, T., Higuchi, T., Hotta, H., Iwakiri, T., Jinno, T., Kino, K., Takano, Y., Toda, M., Yamazaki, K., Chikira, M., Kodama, T., Michibata, T., Miura, H.-R., Nitta, T., Ogura, T., Saito, F., Sekiguchi, M., Suzuki, T., Suzuki, K., Tatebe, H., Watanabe, M., Watanabe, S., Yoshimura, K., 2021. Description of MIROC6 AGCM MIROC6 AGCM document writing team *. <https://doi.org/10.15083/0002000180>
- Angarita, H., Wickel, A., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J., Herrera-R, G., Purkey, D., 2018. Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrol Earth Syst Sci* 2839–2865.
- animales Colombia, 2020. *Hydrolycus scomberoides* [WWW Document]. URL <https://animalesdecolombia.com.co/peces/amazonia/pez-payara/> (accessed 2.20.24).
- Aquariofilia, 2023. *DICROSSUS FILAMENTOSUS* [WWW Document]. URL <https://aquariofilia.webcindario.com/dicrossus-filamentosus.html> (accessed 2.20.24).
- Asociación de Consejos Comunitarios y Organizaciones del Bajo Atrato (ASCOBA, Unidad de Restitución de Tierras (URT), Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR), 2016. Los derechos al territorio, a la identidad cultural y a la restitución de las comunidades negras, afrocolombianas, raizales y palenqueras.

- Beechie, T.J., Liermann, M., Pollock, M.M., Baker, S., Davies, J., 2006. Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river systems. *Geomorphology* 78, 124–141. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.030>
- Beer, T., Young, P.C., 1983. Longitudinal Dispersion in Natural Streams. *Journal of Environmental Engineering* 109, 1049–1067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1983\)109:5\(1049\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1983)109:5(1049))
- Beven, K., Binley, A., 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol Process* 6, 279–298. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>
- Bjerklie, D.M., 2007. Estimating the bankfull velocity and discharge for rivers using remotely sensed river morphology information. *J Hydrol (Amst)* 341, 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.011>
- British Survey of Fertiliser Practice, 2018. The British survey of fertiliser practice: Fertiliser use on farm crops for crop year 2017. Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- Buffington, J.M., Montgomery, D.R., 2022. Geomorphic Classification of Rivers: An Updated Review, in: *Treatise on Geomorphology*. Elsevier, pp. 1143–1190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00077-8>
- Burbano-Girón, j., Molina Berbeo, M.A., Gutiérrez Montoya, C., Ochoa-Quintero, J.M., Ayazo Toscano, R.A., Cardona Hernández, D., 2020. Estado de conservación y transformación de los humedales en colombia. Bogotá D.C, Colombia.
- CANABIO, 2017. Método de Evaluación Rápida de Invasividad (MERI) para especies exóticas en México *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1816), CONABIO, 2017.
- Capmourteres, V., Anand, M., 2016. “Conservation value”: a review of the concept and its quantification. *Ecosphere* 7. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1476>
- Castello, L., McGrath, D.G., Hess, L.L., Coe, M.T., Lefebvre, P.A., Petry, P., Macedo, M.N., Renó, V.F., Arantes, C.C., 2013. The vulnerability of Amazon freshwater ecosystems. *Conserv Lett* 6, 217–229. <https://doi.org/10.1111/conl.12008>
- Chapra, S.C., 2008. Surface water-quality modeling, 15th ed. Waveland press, Illinois.
- Chicharo, L., Müller, F., Fohrer, N., 2015. Ecosystem Services and River Basin Ecohydrology. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9846-4>
- Colombia Travel, 2021. Caño Cristales, una Maravilla natural [WWW Document]. URL <https://colombia.travel/es/la-macarena/cano-cristales-una-maravilla-natural> (accessed 2.20.24).
- CONPES 3797, 2017. Política para el desarrollo integral de la Orinoquía: Altillanura - Fase I.
- CORMACARENA, CORPORINOQUIA, ECOPETROL, CIAT (Institutional center for tropical agriculture), (CGIAR) Climate change, A. and F. security, 2017. PLAN REGIONAL INTEGRAL DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA ORINOQUIA. Cali, Colombia.
- Correa-Caselles, D., 2022. Metodología para la estimación del destino y transporte de mercurio presente en los ríos de Colombia (Thesis). Univerdad de los Andes, Bogotá D.C.
- Cote, D., Kehler, D.G., Bourne, C., Wiersma, Y.F., 2009. A new measure of longitudinal connectivity for stream networks. *Landsc Ecol* 24, 101–113. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9283-y>
- DANE, Ministerio del Interior, Gobernación del Meta, 2010. Cartografía Social Indígena del Departamento del Meta. Restrepo.

- Dawson, C.W., Abrahart, R.J., See, L.M., 2007. HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling and Software* 22, 1034–1052. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.008>
- de Leon, D.R., 2017. Analisis De Sincronizacion Espacio-Temporal De Señales Oceano-Atmosfericas Y Variables Hidroclimatologicas En Colombia.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2018. Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 [WWW Document]. DANE. URL <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018> (accessed 8.17.22).
- Departamento Nacional de Planeación, 2016. Gobierno prepara paquete de obras para desarrollar la Orinoquía 1–1.
- Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Transporte, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022. DOCUMENTO CONPES 4106: DECLARACIÓN DE IMPORTANCIA ESTRATÉGICA REGIONAL DE LOS PROYECTOS DE INVERSIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DE LA COMPETITIVIDAD DE LA REGIÓN LLANOS - DEPARTAMENTOS GUAVIARE, META, CASANARE Y GUAINÍA. Bogotá, Colombia.
- Diaz, F.A., Katz, L.E., Lawler, D.F., 2020. Mercury pollution in Colombia: challenges to reduce the use of mercury in artisanal and small-scale gold mining in the light of the Minamata Convention. *Water Int* 45, 730–745. <https://doi.org/10.1080/02508060.2020.1845936>
- Domínguez Calle, E.A., 2018. Cambio climático y variabilidad climática extrema en el Huila . Editorial Académica Española , Neiva, Huila.
- Domínguez, E., 2016. Concepto de magnitud aleatoria [WWW Document]. URL <https://docs.google.com/a/mathmodelling.org/viewer?a=v&pid=sites&srcid=bWF0aG1vZGVs bGluZy5vcmd8d3d3fGd4OjUwMjM1NzE0ZDBlZWJlOTk> (accessed 10.8.16).
- Dominguez, E., 2015. Temperatura del aire [WWW Document]. URL <http://www.mathmodelling.org/hidroclimatologia> (accessed 2.24.22).
- Dorji, T., Linke, S., Sheldon, F., 2020. Freshwater conservation planning in the context of nature needs half and protected area dynamism in Bhutan. *Biol Conserv* 251, 108785. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108785>
- Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arsouze, T., Bergman, T., Bernardello, R., Boussetta, S., Caron, L.P., Carver, G., Castrillo, M., Catalano, F., Cvijanovic, I., Davini, P., Dekker, E., Doblas-Reyes, F.J., Docquier, D., Echevarria, P., Fladrich, U., Fuentes-Franco, R., Gröger, M., Hardenberg, J. v., Hieronymus, J., Karami, M.P., Keskinen, J.P., Koenigk, T., Makkonen, R., Massonnet, F., Ménégos, M., Miller, P.A., Moreno-Chamarro, E., Nieradzik, L., van Noije, T., Nolan, P., O'donnell, D., Ollinaho, P., van den Oord, G., Ortega, P., Prims, O.T., Ramos, A., Reerink, T., Rousset, C., Ruprich-Robert, Y., le Sager, P., Schmith, T., Schrödner, R., Serva, F., Sicardi, V., Sloth Madsen, M., Smith, B., Tian, T., Tourigny, E., Uotila, P., Vancoppenolle, M., Wang, S., Wärlind, D., Willén, U., Wyser, K., Yang, S., Yepes-Arbós, X., Zhang, Q., 2022. The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geosci Model Dev* 15, 2973–3020. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>
- Duarte, I., Rego, F.C., Casquilho, J.P., Arsénio, P., 2016. A Relevance Index for the habitat areas of Natura 2000 Network based on their Rarity and Representativeness. *Ecol Indic* 61, 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.015>

- Einheuser, M.D., Nejadhashemi, A.P., Wang, L., Sowa, S.P., Woznicki, S.A., 2013. Linking Biological Integrity and Watershed Models to Assess the Impacts of Historical Land Use and Climate Changes on Stream Health. *Environ Manage* 51, 1147–1163. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0043-7>
- Engelund, F., Hansen, E., 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark Østervoldgade 10, Copenhagen K.
- Equivel, O., 2007. Diagnóstico nacional de la calidad sanitaria de las aguas superficiales de El Salvador. San Salvador.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2018. Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta.
- Flores, A.N., Bledsoe, B.P., Cuhaciyan, C.O., Wohl, E.E., 2006. Channel-reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data. *Water Resour Res* 42. <https://doi.org/10.1029/2005WR004226>
- Flotemersch, J.E., Leibowitz, S.G., Hill, R.A., Stoddard, J.L., Thoms, M.C., Tharme, R.E., 2016. A Watershed Integrity Definition and Assessment Approach to Support Strategic Management of Watersheds. *River Res Appl* 32, 1654–1671. <https://doi.org/10.1002/rra.2978>
- Fundación Charles Darwin, 2022. *Oreochromis niloticus* [WWW Document]. URL <https://www.darwinfoundation.org/es/datazone/checklist?species=5020> (accessed 2.20.24).
- Gallant, J.C., Dowling, T.I., 2003. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resour Res* 39. <https://doi.org/10.1029/2002WR001426>
- Galvis, G., Mojica, J.I., Provenzano, F., Lasso, C.A., Taphorn, D.C., Royero, R., Castellanos-Castillo, C., Gutiérrez-Cortés, Á., Gutiérrez, M., Pinto, Y., Mesa, L.M., Sánchez, P., Cipamocha, C.A., 2007. Peces de la Orinoquía colombiana con énfasis en especies de interés ornamental. Bogotá.
- Gassón, R.A., 2002. Orinoquia: the archaeology of the Orinoco River Basin. *J World Prehist* 16, 237–311.
- GBIF, 2023. *Hemigrammus micropterus* [WWW Document]. URL <https://www.gbif.org/es/species/2354353> (accessed 2.20.24).
- Gottelman, A., Hannay, C., Bacmeister, J.T., Neale, R.B., Pendergrass, A.G., Danabasoglu, G., Lamarque, J.F., Fasullo, J.T., Bailey, D.A., Lawrence, D.M., Mills, M.J., 2019. High Climate Sensitivity in the Community Earth System Model Version 2 (CESM2). *Geophys Res Lett* 46, 8329–8337. <https://doi.org/10.1029/2019GL083978>
- Giri, Subhasis, Zhang, Z., Krasnuk, D., Lathrop, R.G., 2019. Evaluating the impact of land uses on stream integrity using machine learning algorithms. *Science of The Total Environment* 696, 133858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133858>
- Giri, S., Zhang, Z., Krasnuk, D., Lathrop, R.G., 2019. Evaluating the impact of land uses on stream integrity using machine learning algorithms. *Science of The Total Environment* 696, 133858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133858>
- Glantz, M.H., Katz, R.W., Nicholls, N., 1991. Teleconnections linking worldwide climate anomalies : scientific basis and societal impact.
- Gnann, S.J., Coxon, G., Woods, R.A., Howden, N.J.K., McMillan, H.K., 2021. TOSSH: A Toolbox for Streamflow Signatures in Hydrology. *Environmental Modelling & Software* 138, 104983. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104983>

- González, R., 2008. Determinación del comportamiento de la fracción dispersiva en ríos característicos de montaña. UNAL, Bogotá D.C. .
- Grubbs, F.E., 1950. Sample criteria for testing outlying observations. *The Annals of Mathematical Statistics* 27–58.
- Gupta, R., Bhattarai, R., Mishra, A., 2019. Development of climate data bias corrector (CDBC) tool and its application over the agro-ecological zones of India. *Water (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/w11051102>
- Hayakawa, Y.S., Oguchi, T., 2006. DEM-based identification of fluvial knickzones and its application to Japanese mountain rivers. *Geomorphology* 78, 90–106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.018>
- He, F., Bremerich, V., Zarfl, C., Geldmann, J., Langhans, S.D., David, J.N.W., Darwall, W., Tockner, K., Jähnig, S.C., 2018. Freshwater megafauna diversity: Patterns, status and threats. *Divers Distrib* 24, 1395–1404. <https://doi.org/10.1111/ddi.12780>
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G.B.M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M.N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M.A., Vargas, R., MacMillan, R.A., Batjes, N.H., Leenaars, J.G.B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., Kempen, B., 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS One* 12, e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Heras-Sierra, T., Enríquez-Verdugo, I., Rubio, Ja., Anne-Marie, P., Barajas-Cruz, R., 2016. Comportamiento de *Escherichia coli* en heces de vacas adicionadas con taninos hidrolizables. *Abanico Veterinario* 6. <https://doi.org/10.21929/abavet2016.63.4>
- Hermoso, V., Linke, S., Preda, J., Possingham, H.P., 2011. Addressing longitudinal connectivity in the systematic conservation planning of fresh waters. *Freshw Biol* 56, 57–70. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02390.x>
- Herrera-Pérez, J., Parra, J.L., Restrepo-Santamaría, D., Jiménez-Segura, L.F., 2019. The Influence of Abiotic Environment and Connectivity on the Distribution of Diversity in an Andean Fish Fluvial Network. *Front Environ Sci* 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00009>
- Herrmann, H., Bucksch, H., 2014. Flow Duration Curve. *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik* 543–543. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_61893
- Higgins, J., Zablocki, J., Newsock, A., Krolopp, A., Tabas, P., Salama, M., 2021. Durable Freshwater Protection: A Framework for Establishing and Maintaining Long-Term Protection for Freshwater Ecosystems and the Values They Sustain. *Sustainability* 13, 1950. <https://doi.org/10.3390/su13041950>
- ICANH, 2021. Llanos Orientales- Atributos sitios arqueológicos.
- ICANH (Instituto Colombiano de Antropología e Historia), 2021. ¿Por qué preservar el Patrimonio Arqueológico? Bogotá.
- IDEAM, 2019. Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá D.C.
- IDEAM, 2011. Estudio Nacional del Agua 2010.

- IDEAM, 2010a. Leyenda Nacional de Nomenclaturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM, 2010b. Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D.C.: Ideam: 420 pp., Estudio nacional del agua.
- IDEAM, 2010c. Estudio Nacional de Agua 2010. Bogotá D.C.
- IDEAM, 2010d. Estudio Nacional del Agua 2010, Instituto de Hidrología, Meteorología. y Estudios Ambientales. Bogotá D.C.
- Iglesias-Martínez, L., 1994. El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid (España).
- Instituto Humboldt Colombia, Ecopetrol, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Cooperación Alemana, 2018. El gran libro de la Orinoquia Colombiana. Bogotá, Colombia.
- Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, 2022. Cicatrices de quema por región (Histórico). Escala: 1:100.000 [WWW Document]. URL <https://datos.siatac.co/datasets/cicatrices-de-quema-por-regi%C3%B3n-hist%C3%B3rico-escala-1100-000/explore> (accessed 5.22.23).
- Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, 2020. Capa consolidada multitemporal de degradación de bosque de la Amazonia colombiana. Escala 1:100.000 - 2002 - 2020.
- Instituto Colombiano Agropecuario, 2021. Censos Pecuarios Nacional - Censo de Bovinos 2021 [WWW Document]. Instituto Colombiano Agropecuario. URL <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018> (accessed 8.7.22).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2022. Cartografía Base Escala 1:100.000.
- Jackson-Blake, L.A., Wade, A.J., Fitter, M.N., Butterfield, D., Couture, R.-M., Cox, B.A., Crossman, J., Ekholm, P., Halliday, S.J., Jin, L., Lawrence, D.S.L., Lepistö, A., Lin, Y., Rankinen, K., Whitehead, P.G., 2016. The INtegrated CAatchment model of phosphorus dynamics (INCA-P): Description and demonstration of new model structure and equations. *Environmental Modelling & Software* 83, 356–386. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.05.022>
- Juwana, I., Muttill, N., Perera, B.J.C., 2012. Indicator-based water sustainability assessment — A review. *Science of The Total Environment* 438, 357–371. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.093>
- Klimaszyn, P., Goldyn, R., 2020. Water Quality of Freshwater Ecosystems in a Temperate Climate. *Water (Basel)* 12, 2643. <https://doi.org/10.3390/w12092643>
- Kukkala, A.S., Moilanen, A., 2013. Core concepts of spatial prioritisation in systematic conservation planning. *Biological Reviews* 88, 443–464. <https://doi.org/10.1111/brv.12008>
- Kurtz, W., Lapin, A., Schilling, O.S., Tang, Q., Schiller, E., Braun, T., Hunkeler, D., Vereecken, H., Sudicky, E., Kropf, P., Hendricks Franssen, H.-J., Brunner, P., 2017. Integrating hydrological modelling, data assimilation and cloud computing for real-time management of water resources. *Environmental Modelling & Software* 93, 418–435. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.011>
- Lasso, C., Córdoba, D., Morales, M., 2017. XVI. Áreas clave para la conservación de la biodiversidad dulceacuícola amenazada en Colombia: moluscos, cangrejos, peces, tortugas, crocodílidos, aves y mamíferos. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá D. C.

- Lasso, C.A., Usma, J.S., Trujillo, F., Rial, A., 2010. Biodiversidad de la cuenca del orinoco: bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Lees, M.J., Camacho, L., Whitehead, P., 1998. Extension of the QUASAR river water quality model to incorporate dead-zone mixing. *Hydrol Earth Syst Sci* 2, 353–365. <https://doi.org/10.5194/hess-2-353-1998>
- Lindroth, E.M., Rhoads, B.L., Castillo, C.R., Czuba, J.A., Güneralp, İ., Edmonds, D., 2020. Spatial Variability in Bankfull Stage and Bank Elevations of Lowland Meandering Rivers: Relation to Rating Curves and Channel Planform Characteristics. *Water Resour Res* 56. <https://doi.org/10.1029/2020WR027477>
- Linke, S., Hermoso, V., 2022. Biodiversity Conservation of Aquatic Ecosystems, in: *Encyclopedia of Inland Waters*. Elsevier, pp. 641–652. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00202-4>
- Linke, S., Turak, E., Nel, J., 2011. Freshwater conservation planning: the case for systematic approaches. *Freshw Biol* 56, 6–20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02456.x>
- Loaiza Venegas, A., 2018. Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales. LA REPUBLICA.
- López-Ricaurte, L., Edwards, D.P., Romero-Rodríguez, N., Gilroy, J.J., 2017. Impacts of oil palm expansion on avian biodiversity in a Neotropical natural savanna. *Biol Conserv* 213, 225–233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.07.009>
- Maco-García, J.T., 2006. Tipos de ambientes acuáticos de la Amazonía Peruana. *Folia Amazónica* 15, 131. <https://doi.org/10.24841/fa.v15i1-2.231>
- Mamani, J.A., 2022. Desarrollo de un modelo numérico de calidad del agua en un marco probabilístico de soporte a las decisiones a escala nacional (Thesis). Universidad de los Andes, Bogotá D.C.
- Marco, V., 2021. Principales Conclusiones Sexto Informe IPCC.
- Mauritsen, T., Bader, J., Becker, T., Behrens, J., Bittner, M., Brokopf, R., Brovkin, V., Claussen, M., Crueger, T., Esch, M., Fast, I., Fiedler, S., Fläschner, D., Gayler, V., Giorgetta, M., Goll, D.S., Haak, H., Hagemann, S., Hedemann, C., Hohenegger, C., Ilyina, T., Jahns, T., Jimenez-de-la-Cuesta, D., Jungclaus, J., Kleinen, T., Kloster, S., Kracher, D., Kinne, S., Kleberg, D., Lasslop, G., Kornbluh, L., Marotzke, J., Matei, D., Meraner, K., Mikolajewicz, U., Modali, K., Möbis, B., Müller, W.A., Nabel, J.E.M.S., Nam, C.C.W., Notz, D., Nyawira, S.S., Paulsen, H., Peters, K., Pincus, R., Pohlmann, H., Pongratz, J., Popp, M., Raddatz, T.J., Rast, S., Redler, R., Reick, C.H., Rohrschneider, T., Schemann, V., Schmidt, H., Schnur, R., Schulzweida, U., Six, K.D., Stein, L., Stemmler, I., Stevens, B., von Storch, J.S., Tian, F., Voigt, A., Vrese, P., Wieners, K.H., Wilkenskjaeld, S., Winkler, A., Roeckner, E., 2019. Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and Its Response to Increasing CO₂. *J Adv Model Earth Syst* 11, 998–1038. <https://doi.org/10.1029/2018MS001400>
- McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J., 1979. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics* 21, 239–245.
- McMillan, H., 2021. A review of hydrologic signatures and their applications. *WIREs Water* 8. <https://doi.org/10.1002/wat2.1499>
- McMillan, H., 2020. Linking hydrologic signatures to hydrologic processes: A review. *Hydrol Process* 34, 1393–1409. <https://doi.org/10.1002/hyp.13632>

- Medrano Acosta, D.Alejandro., 2019. EL CANTAR DEL LLANERO DE PIEDRA. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015. Resolución 631 de 2015 - Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones [WWW Document]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. URL <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf> (accessed 6.10.22).
- Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Colombia, Bogotá D.C.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2017. Resolución 0330 - "Por la cual se adopta el reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. Bogotá.
- Ministerio del Interior, Organización Nacional Indígena de Colombia, 2013. DOCUMENTO PLAN SALVAGUARDA DEL PUEBLO INDIGENA SIKUANI DE LOS LLANOS ORIENTALES DE COLOMBIA. Villavicencio.
- MiPEZ (TNC), 2022. *Crenicichla anthurus* [WWW Document]. URL <http://aspengroupnet.com/mi-pez/index.php/node/4155> (accessed 2.20.24).
- Mojica, J.I., Usma Oviedo, J.S., Alvarez León, R., Lasso, C.A. (Carlos A., 2012. Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia (2012). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales, Bogotá.
- Molina - Posada, V., Sánchez, S.A., Torres, S.C., 2017. Zonas de Reserva Campesina en el escenario del posconflicto. Bogotá.
- Monteiro, E.B., da Silva, A.C., Souza, A.P., Tanaka, A.A., Ferneda, B.G., Martim, C.C., 2016. Water requirements and crop coefficients of tropical forest seedlings in different shading conditions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 20, 709–715. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n8p709-715>
- Morales-Betancourt, M., Lasso, C., Bello, L., Gutiérrez, F. de P., 2014. Potential distribution of the Orinoco crocodile (*Crocodylus intermedius* Graves 1819) in the Orinoco basin of Colombia and Venezuela. *Biota Colomb* 15.
- NATIONAL GEOGRAPHIC, 2021. Especies extintas: ¿qué son y cómo se llega a la desaparición total? [WWW Document].
- Natural Capital Project, 2022. InVEST 3.13.0.post6+ug.g6b07b42 User's Guide.
- Navas, A., 2016. Factores de asimilación de carga contaminante en ríos - una herramienta para la identificación de estrategias de saneamiento hídrico en países en desarrollo.
- NOAA, 2018. Datos - NOAA/AOML [WWW Document]. URL <https://www.aoml.noaa.gov/es/data-products/> (accessed 2.21.23).
- Nogales, J., Rogéliz Prada, C.A., Walschburger, T., 2021. Hydrological Modeling for Multifunctional Landscape Planning in the Orinoquia Region of Colombia. *Front Environ Sci* 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.673215>

- Nogales, J., Rogéliz-Prada, C., Cañon, M.A., Vargas-Luna, A., 2023. An integrated methodological framework for the durable conservation of freshwater ecosystems: a case study in Colombia's Caquetá River basin. *Front Environ Sci* 11, 1264392. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1264392>
- Nogueira, J.G., Lopes-Lima, M., Beja, P., Filipe, A.F., Froufe, E., Gonçalves, D. V., da Silva, J.P., Sousa, R., Teixeira, A., Varandas, S., Hermoso, V., 2023. Identifying freshwater priority areas for cross-taxa interactions. *Science of The Total Environment* 864, 161073. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161073>
- ONU, 2022. Kunming-Montreal Global biodiversity framework - Draft decision submitted by the President, <https://www.cbd.int/new/>.
- Organización Colparques, 2023. Cerros de Mavecure [WWW Document]. URL <http://www.colparques.net/MAVECURI#aceptar> (accessed 2.20.24).
- Orjuela, L., Lopez, M., 2011. Índice de calidad del agua en corrientes superficiales (ICA), Bogotá: Subdirección de Hidrología y Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental. Bogotá D.C.
- Pacheco, H.A., Cevallos, R.X., VINCES, C.J., 2019. Cálculo del factor C de la RUSLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo-Venezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS-1. *Revista Espacios* 40.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., Montanarella, L., 2015. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land use policy* 48, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Parker, Gary, Wilcock, P.R., Paola, C., Dietrich, W.E., Pitlick, J., 2007. Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers. *J Geophys Res Earth Surf* 112. <https://doi.org/10.1029/2006JF000549>
- Parker, G, Wilcock, P.R., Paola, C., Dietrich, W.E., Pitlick, J., 2007. Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers. *J Geophys Res Earth Surf* 112. <https://doi.org/10.1029/2006JF000549>.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2024. RUNAP [WWW Document]. URL <https://runap.parquesnacionales.gov.co/> (accessed 6.12.24).
- Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2022. Parque Nacional Natural El Tuparro [WWW Document]. URL <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/es/ecoturismo/parques/region-amazonia-y-orinoquia/parque-nacional-natural-el-tuparro/> (accessed 2.20.24).
- Pérez García, J., Menéndez García, M., n.d. HABILIDAD DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES PARA EL DESARROLLO DE PROYECCIONES REGIONALES.
- Pérez-Arango, J., Mesa, O., 2002. Estimación del factor de erosividad de la lluvia en Colombia (Conferencia). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Pérez-Vélez, J.P., 2014. Uso de los fertilizantes y su impacto en la producción agrícola (Thesis). Escuela de Biociencias. Universidad Nacional de Colombia , Medellín.
- Pinzón, C.P., Fajardo Gómez, C.A., 2018. Impacto del mercurio en los ecosistemas colombianos y las técnicas aplicables para su biorremediación . *ECAPMA WORKING PAPERS* 2, 1–12.

- Poff, N. LeRoy, Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C., 1997. The Natural Flow Regime. *Bioscience* 47, 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
- Poff, N LeRoy, Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C., 1997. The natural flow regime. *Bioscience* 47, 769–784.
- POFF, N.L., RICHTER, B.D., ARTHINGTON, A.H., BUNN, S.E., NAIMAN, R.J., KENDY, E., ACREMAN, M., APSE, C., BLEDSOE, B.P., FREEMAN, M.C., HENRIKSEN, J., JACOBSON, R.B., KENNEN, J.G., MERRITT, D.M., O'KEEFE, J.H., OLDEN, J.D., ROGERS, K., THARME, R.E., WARNER, A., 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshw Biol* 55, 147–170. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x>
- Portocarrero Aya, M., Lee, J., 2021. Hacia un nuevo modelo de desarrollo sostenible para la Orinoquía en Colombia [WWW Document].
- Quiñones, J., 2023. Ictioplancton en el brazo Bayonero del río Arauca, con énfasis en Siluriforme. Universidad de los Llanos, Meta.
- Ramirez, A., Restrepo, R., Viña, G., 1997. Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. *Formulaciones y aplicación. CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro* 1, 135–153.
- Ramirez, J., Hernández, Á., Rodríguez, J., 2005. Plan de vida Indígena- resguardo de Corocoro.
- Ratri, D.N., Whan, K., Schmeits, M., 2019. A comparative verification of raw and bias-corrected ECMWF seasonal ensemble precipitation reforecasts in Java (Indonesia). *J Appl Meteorol Climatol* 58, 1709–1723. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0210.1>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., coordinators, 1996. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture handbook* 703.
- Riato, L., Leibowitz, S.G., Weber, M.H., 2020. The use of multiscale stressors with biological condition assessments: A framework to advance the assessment and management of streams. *Science of The Total Environment* 737, 139699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139699>
- Ríos-Villamizar, E., Adeney, J., Piedade, M., Junk, W., 2020. New insights on the classification of major Amazonian river water types. *Sustain Water Resour Manag* 6, 83. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00440-5>
- Roa, C., Rodríguez, L.M., 2017. Plan Maestro de la Orinoquía: Observaciones a las prioridades en Desarrollo productivo sostenible relacionadas con la aplicación de la ley ZIDRES 1776 de 2016 en Casanare. *Revista Territorio y Desarrollo* 1, 7–19.
- Rodríguez, D. k., 2022. La deforestación en Colombia subió 11 % en el primer semestre de 2022. *Portafolio Colombia*.
- Rojas, A., 2011. Aplicación de factores de asimilación para la priorización de la inversión en sistemas de saneamiento hídrico en Colombia (Thesis). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Rosenberg, D.M., McCully, P., Pringle, C.M., 2000. Global-scale environmental effects of hydrological alterations: introduction. *Bioscience* 50, 746–751.
- Ross, S.M., 2007. Expectation of a random variable, in: *Introduction to Probability Models*. Academic Press, p. 38.

- Rozos, D., Skilodimou, H.D., Loupasakis, C., Bathrellos, G.D., 2013. Application of the revised universal soil loss equation model on landslide prevention. An example from N. Euboea (Evia) Island, Greece. *Environ Earth Sci* 70, 3255–3266. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2390-3>
- Saade, M., Páramo, C., 2018. Lugares Sagrados: definiciones y amenazas. Bogotá.
- Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., Dubois, G., 2017. Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecol Indic* 76, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.047>
- Saxena, A., Prasad, M., Gupta, A., Bharill, N., Patel, O.P., Tiwari, A., Er, M.J., Ding, W., Lin, C.-T., 2017. A review of clustering techniques and developments. *Neurocomputing* 267, 664–681. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.06.053>
- Schmitt, R.J.P., Bizzi, S., Castelletti, A., 2016. Tracking multiple sediment cascades at the river network scale identifies controls and emerging patterns of sediment connectivity. *Water Resour Res* 52, 3941–3965. <https://doi.org/10.1002/2015WR018097>
- Shaad, K., Souter, N.J., Farrell, T., Vollmer, D., Regan, H.M., 2018. Evaluating the sensitivity of dendritic connectivity to fish pass efficiency for the Sesan, Srepok and Sekong tributaries of the Lower Mekong. *Ecol Indic* 91, 570–574. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.034>
- Sociedad de Agricultores de Colombia, 2002. Guía ambiental para las plantas del beneficio del ganado. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Swart, N.C., Cole, J.N.S., Kharin, V. v., Lazare, M., Scinocca, J.F., Gillett, N.P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J.R., Hanna, S., Jiao, Y., Lee, W.G., Majaess, F., Saenko, O.A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Sigmond, M., Solheim, L., von Salzen, K., Yang, D., Winter, B., 2019. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). *Geosci Model Dev* 12, 4823–4873. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>
- Tangi, M., Schmitt, R., Bizzi, S., Castelletti, A., 2019. The CASCADE toolbox for analyzing river sediment connectivity and management. *Environmental Modelling & Software* 119, 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.07.008>
- Teegavarapu, R., Elshorbagy, A., 2005a. Fuzzy conjunto medida de error basado en la evaluación del modelo hidrológico. *Journal of Hydroinformatics* 7, 199–207.
- Teegavarapu, R., Elshorbagy, A., 2005b. Fuzzy conjunto medida de error basado en la evaluación del modelo hidrológico. *Journal of Hydroinformatics*, 7, 199–207.
- Téllez, P., Petry, P., Walschburger, T., Higgins, J., Apse, C., 2011. Portafolio de Conservación de Agua Dulce para la Cuenca del Magdalena - Cauca. Bogotá D.C.
- The Nature Conservancy, 2019. MANIFIESTO PACTO ORINOQUIA SOSTENIBLE VISIÓN 2030.
- Thieme, M., Lehner, B., Abell, R., Hamilton, S.K., Kellndorfer, J., Powell, G., Riveros, J.C., 2007. Freshwater conservation planning in data-poor areas: An example from a remote Amazonian basin (Madre de Dios River, Peru and Bolivia). *Biol Conserv* 135, 484–501. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.10.054>
- Thomas, H.A., 1981. Improved methods for National Water Assessment. Wahington, DC, USA.
- Thomas Jr, H., 1981. Improved methods for national tvater assessment water resources contract: WR15249270. US Water Resources Council.

- Thornbrugh, D.J., Leibowitz, S.G., Hill, R.A., Weber, M.H., Johnson, Z.C., Olsen, A.R., Flotemersch, J.E., Stoddard, J.L., Peck, D. V., 2018. Mapping watershed integrity for the conterminous United States. *Ecol Indic* 85, 1133–1148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.070>
- Tognelli, M.F., Anderson, E.P., Jiménez-Segura, L.F., Chuctaya, J., Chocano, L., Maldonado-Ocampo, J.A., Mesa-Salazar, L., Mojica, J.I., Carvajal-Vallejos, F.M., Correa, V., Ortega, H., Rivadeneira Romero, J.F., Sánchez-Duarte, P., Cox, N.A., Hidalgo, M., Jiménez Prado, P., Lasso, C.A., Sarmiento, J., Velásquez, M.A., Villa-Navarro, F.A., 2019. Assessing conservation priorities of endemic freshwater fishes in the Tropical Andes region. *Aquat Conserv* 29, 1123–1132. <https://doi.org/10.1002/aqc.2971>
- Tosic, R., Dragicevic, S., Kostadinov, S., Dragovic, N., others, 2011. ASSESSMENT OF SOIL EROSION POTENTIAL BY THE USLE METHOD: CASE STUDY, REPUBLIC OF SRPSKA- BiH. *Fresenius Environ Bull* 20, 1910–1917.
- UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), 2012. CATEGORÍAS Y CRITERIOS DE LA LISTA ROJA DE LA UICN. Gland, Suiza.
- Unidad de Planeación Minero Energética, 2022. Títulos Mineros de Colombia [WWW Document]. Unidad de Planeación Minero Energética. URL http://sig.simec.gov.co/UPME_MI_minas/ (accessed 5.11.22).
- Universidad de los Andes - Centro de Estudios de la Orinoquía, García, N., 2019. GANADERÍA SOSTENIBLE EN LA ORINOQUIA, UNA APUESTA PARA SALVAR UNA TRADICIÓN LLANERA.
- Universidad Nacional de Colombia, 2013. Caracterización Región de la Orinoquía. Bogotá, Colombia.
- UPME, 2017. Realizar una investigación en aspectos claves sobre la trazabilidad en la comercialización del oro en el país, analizando las variables técnicas y económicas de los actores involucrados en la comercialización del metal a nivel nacional e internacional, así como identificar casos de éxito en la implementación de tecnologías limpias para la eliminación de mercurio en procesos mineros auríferos y generar guías de buenas prácticas en el comercio de oro en la pequeña minería. Bogotá.
- Valencia-Rodríguez, D., Jiménez-Segura, L., Rogéliz, C.A., Parra, J.L., 2022. A simple and extensible framework to identify key areas for the conservation of single vulnerable freshwater species. *Biol Conserv* 273, 109672. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109672>
- Van Campenhout, J., Houbrechts, G., Peeters, A., Petit, F., 2020. Return Period of Characteristic Discharges from the Comparison between Partial Duration and Annual Series, Application to the Walloon Rivers (Belgium). *Water (Basel)* 12, 792. <https://doi.org/10.3390/w12030792>
- Vannote, R.L., 1981. The river continuum: a theoretical construct for analysis of river ecosystems, in: *Proceedings of the National Symposium on Freshwater Inflow to Estuaries*. pp. 289–304.
- Velasco Sánchez, A.N., 2016. INTEGRACIÓN DEL CONCEPTO DE VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN PRONÓSTICOS DE LARGO PLAZO DE RESOLUCIÓN MENSUAL EN COLOMBIA. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Velásquez-Tibatá, J., Olaya-Rodríguez, M.H., López-Lozano, D., Gutiérrez, C., González, I., Londoño-Murcia, M.C., 2019. BioModelos: A collaborative online system to map species distributions. *PLoS One* 14, e0214522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214522>
- Velez, J., Poveda, G., Mesa, O., 2000. *Balances Hidrologicos de Colombia*. Medellín.

- Ven Te Chow, Maidment, D.R., Mays, L.W., 1994. *Hidrologia Aplicada*.
- Venarsky, M.P., Walters, D.M., Hall, R.O., Livers, B., Wohl, E., 2018. Shifting stream planform state decreases stream productivity yet increases riparian animal production. *Oecologia* 187, 167–180. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4106-6>
- Wade, A.J., Butterfield, D., Griffiths, T., Whitehead, P.G., 2007. Eutrophication control in river-systems: an application of INCA-P to the River Lugg. *Hydrol Earth Syst Sci* 11, 584–600. <https://doi.org/10.5194/hess-11-584-2007>
- Wagener, T., Lees, M., Wheeler, H., 2000. *Monte-Carlo Analysis Toolbox User Manual*. London.
- Wallis, C., Séon-Massin, N., Martini, F., Schoupe, M., 2011. *Onema meeting: implementation of the Water Framework Directive – when ecosystem services come into play*. Brussels, 2011.
- Wetzel, R.G., 2001. Freshwater Ecosystems, in: *Encyclopedia of Biodiversity*. Elsevier, pp. 560–569. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00060-5>
- Whitehead, P.G., Jin, L., Baulch, H.M., Butterfield, D.A., Oni, S.K., Dillon, P.J., Futter, M., Wade, A.J., North, R., O'Connor, E.M., Jarvie, H.P., 2011. Modelling phosphorus dynamics in multi-branch river systems: A study of the Black River, Lake Simcoe, Ontario, Canada. *Science of The Total Environment* 412–413, 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.073>
- Wilkerson, G. V., Parker, G., 2011. Physical Basis for Quasi-Universal Relationships Describing Bankfull Hydraulic Geometry of Sand-Bed Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering* 137, 739–753. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000352](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000352)
- Williams, B.A., 2020. Minimising the loss of biodiversity and ecosystem services in an intact landscape under risk of rapid agricultural development. *Environmental Research Letters* 15, 1–14.
- Williams, Brooke A, Grantham, H.S., Watson, J.E.M., Alvarez, S.J., Simmonds, J.S., Rogéliz, C.A., Da Silva, M., Forero-Medina, G., Etter, A., Nogales, J., Walschburger, T., Hyman, G., Beyer, H.L., 2020. Minimising the loss of biodiversity and ecosystem services in an intact landscape under risk of rapid agricultural development. *Environmental Research Letters* 15, 14001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5ff7>
- Williams, Brooke A., Grantham, H.S., Watson, J.E.M., Alvarez, S.J., Simmonds, J.S., Rogéliz, C.A., Da Silva, M., Forero-Medina, G., Etter, A., Nogales, J., Walschburger, T., Hyman, G., Beyer, H.L., 2020. Minimising the loss of biodiversity and ecosystem services in an intact landscape under risk of rapid agricultural development. *Environmental Research Letters* 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5ff7>
- Williams, P., Gibbons, D., Margules, C., Rebelo, A., Humphries, C., Pressey, R., 1996. A Comparison of Richness Hotspots, Rarity Hotspots, and Complementary Areas for Conserving Diversity of British Birds. *Conservation Biology* 10, 155–174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10010155.x>
- Wilm, H.G., Thornthwaite, C.W., Colman, E.A., Cummings, N.W., Croft, A.R., Gisborne, H.T., Harding, S.T., Hendrickson, A.H., Hoover, M.D., Houk, I.E., others, 1944. Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, 1943–44. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 25, 683–693.
- Wohl, E., 2017. Connectivity in rivers. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 41, 345–362. <https://doi.org/10.1177/0309133317714972>

- Wong, M., Parker, G., 2006. Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database. *Journal of Hydraulic Engineering* 132, 1159–1168. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:11\(1159\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1159))
- WWF, 2022. Servicios Ecosistémicos [WWF Document]. URL <https://www.wwf.org.co/?324210/Glosario-ambiental-Servicios-ecosis-que> (accessed 2.20.24).
- WWF, 2020. LIVING PLANET REPORT 2020- BENDING THE CURVE OF BIODIVERSITY LOSS. Gland, Switzerland.
- WWF Colombia, Foro Nacional por Colombia, 2017. El convenio de Minamata; así actúa Colombia frente al mercurio . Santiago de Cali.
- WWF COLOMBIA, Prüssmann, J., Rincón, S.A., Tavera, H.A., Suárez, C.F., 2020. Estructura ecológica principal de la Orinoquia colombiana. Cali, Colombia .
- WWF, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Instituto Humbolt Colombia, University of Maryland, Fundación Omacha, 2016. CUENCA DEL RÍO ORINOCO REPORTE DE SALUD 2 0 1 6 COLOMBIA.
- Xu, Y., Gao, X., Giorgi, F., 2010. Upgrades to the reliability ensemble averaging method for producing probabilistic climate-change projections. *Clim Res* 41, 61–81. <https://doi.org/10.3354/cr00835>
- Yukimoto, S., Oshima, N., Deushi, M., Koshiro, T., Kawai, H., Y. Tanaka, T., Yoshida, K., 2020. Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. *Prog Earth Planet Sci*.
- Yunus, A.P., Oguchi, T., Hayakawa, Y.S., 2016. Remote identification of fluvial knickzones and their imprints on landscape morphology in the passive margins of Western Arabia. *J Arid Environ* 130, 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.02.016>
- Zamudio, J.E., Maldonado-Ocampo, J.A., 2022. Prioridades para la conservación de los peces de agua dulce en la Orinoquia andina de Colombia. *Caldasia* Vol. 44.
- Zapata, L.A., Usma, J.S., Rodríguez, T., Moreno, X., Franco-Jaramillo, M., García, C., Castellanos-Galindo, G.A., 2020. Recursos pesqueros de Colombia, principales especies, conservación y pesca responsable. AUNAP y WWF Colombia, Cali.
- Zapata, L.A., Usma, S.J., 2013. Guía de las especies Migratorias de la Biodiversidad en Colombia. Peces. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible / WWF-Colombia, Bogotá.
- Zeiringer, B., Seliger, C., Greimel, F., Schmutz, S., 2018. River Hydrology, Flow Alteration, and Environmental Flow, in: *Riverine Ecosystem Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 67–89. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_4
- Ziehn, T., Chamberlain, M.A., Law, R.M., Lenton, A., Bodman, R.W., Dix, M., Stevens, L., Wang, Y.P., Sribinovsky, J., 2020. The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science* 70, 193–214. <https://doi.org/10.1071/ES19035>

Anexos

Listado de Anexos

Anexo 1. [Caracterización KEA – Régimen hidrológico](#)

Anexo 2. [Caracterización KEA – Flujo de sedimentos](#)

Anexo 3. [Caracterización KEA – Calidad el agua](#)

Anexo 4. [Caracterización KEA – Estructura física](#)

Anexo 5. [Caracterización KEA – Conectividad](#)

Anexo 6. [Priorización \(Integridad, Representatividad, Rareza, Complementariedad, Importancia, Grupos de agua dulce, portafolio\)](#)

Anexo 7. [Geodatabase](#)