PROYECTO CUENCA AMAZÓNICA

Informe Final

Evaluación hidrogeológica, de vulnerabilidad y de riesgo para el desarrollo de políticas de protección y uso de aguas subterráneas para la región transfronteriza de Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil)

15 de octubre de 2023

OTCA
Organización del Tratado de Cooperación Amazónica

CuencAmazónica
IMPLEMENTACIÓN DEL PAE

ONU medio ambiente
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

gef

PROYECTO:

Implementación del Programa de Acciones Estratégicas para Asegurar la Gestión Integrada y Sostenible de los Recursos Hídricos Transfronterizos en la Cuenca del Río Amazonas Considerando la Variabilidad Climática y el Cambio Climático



INFORME FINAL

Evaluación hidrogeológica, de vulnerabilidad y de riesgo para el desarrollo de políticas de protección y uso de aguas subterráneas para la región transfronteriza de Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil)

SERVICIOS HIDROGEOLÓGICOS INTEGRALES

SHI SAS

OCTUBRE DE 2023

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA, DE VULNERABILIDAD Y DE RIESGO PARA EL DESARROLLO DE POLÍTICAS DE PROTECCIÓN Y USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA LA REGIÓN TRANSFRONTERIZA DE LETICIA (COLOMBIA) Y TABATINGA (BRASIL)

INFORME FINAL

SERVICIOS HIDROGEOLÓGICOS INTEGRALES
SHI SAS

CONTRATO DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS
GEF/MC/ 650 /2023

OCTUBRE DE 2023

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 18

2. ÁREA DE ESTUDIO 20

3. METODOLOGÍA 22

4. REVISIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA 24

4.1. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA 24
4.1.1. Contexto geológico regional 24
4.1.2. Contexto geológico local: Leticia – Tabatinga. 26
4.2. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA 29
4.2.1. Contexto hidrogeológico regional 30
4.2.2. Unidades hidrogeológicas locales: Leticia – Tabatinga. 31
4.3. VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS 36
4.4. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA 38
4.5. LÍNEA BASE - REGISTRO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA 38
4.6. PIEZOMETRÍA Y DIRECCIONES DE FLUJO 45

5. PRIMER TALLER REGIONAL 47

6. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA 51

6.1. ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA 52
6.2. PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS 59
6.3. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LOS PUNTOS DE AGUA 60
6.4. ANÁLISIS SANITARIO DE LAS CAPTACIONES 77
6.5. USOS Y USUARIOS DEL RECURSO HÍDRICO 78
6.6. ACTUALIZACIÓN DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS 82

7. DEMANDA DE AGUA SUBTERRÁNEA 85

7.1. FUENTES DE INFORMACIÓN 85
7.2. LIMITACIONES 85
7.3. PROCEDIMIENTO DE ESTIMACIÓN 86
7.4. INSUMOS INICIALES 86
7.4.1. Información sobre el abastecimiento de agua potable 86
7.4.2. Información de censos poblacionales 89
7.4.3. Información histórica de suscriptores y consumos de agua 92
7.5. COMPORTAMIENTO SECTORIAL DE CONSUMOS DE AGUA 99
7.5.1. Sector residencial 99
7.5.2. Sector no residencial 101
7.6. DEMANDA HÍDRICA FUTURA 103
7.6.1. Demanda hídrica futura residencial 104
7.6.2. Demanda hídrica futura total 104
7.6.3. Demanda hídrica futura subterránea 104
7.7. RESULTADOS 105
7.7.1. Población actual y futura 105
7.7.2. Dotación de agua actual 110
7.7.3. Demanda hídrica futura total 111
7.7.4. Demanda hídrica actual subterránea 116
7.7.5. Demanda hídrica subterránea futura 117

8. INVENTARIO DE FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN, EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DEL PELIGRO (RIESGO) DE CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO. 119

8.1. INVENTARIO DE LAS FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN. 120
8.1.1. Áreas urbanas sin sistema de alcantarillado 133
8.1.2. Cuerpos de agua contaminados y vertimientos 134
8.1.3. Disposición de residuos sólidos 137
8.1.4. Lagunas de efluentes 139
8.1.4.1. Plantas de tratamiento de agua 140
8.1.5. Estaciones de servicio y lugares de almacenamiento de hidrocarburos 141
8.1.6. Cementerios 143
8.1.7. Otras fuentes de contaminación 144
8.2. CLASIFICACIÓN DE LA CARGA POTENCIAL AL SUELO 149
8.3. VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO 156
8.3.1. Método GOD 156
8.3.2. Método DRASTIC 159
8.4. EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE CONTAMINACIÓN 170
8.5. ESTRATEGIAS PARA MINIMIZAR LOS PELIGROS DE CONTAMINACIÓN IDENTIFICADOS 175

9. ACTUALIZACIÓN DE LA LÍNEA BASE DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y NIVELES DEL AGUA SUBTERRÁNEA 179

9.1. CAMPAÑA DE MONITOREO DEL ACUÍFERO BINACIONAL 179
9.2. RED DE MONITOREO PRELIMINAR (60 PUNTOS) 179
9.3. DEFINICIÓN DE LA RED DE MONITOREO PRELIMINAR 183
9.4. MEDICIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA 184
9.4.1. Georreferenciación de los puntos que conforman la red de monitoreo 184
10.5.2. Estimación de la superficie potenciométrica y dirección de flujo en la zona 188
9.5. TOMA DE MUESTRAS PARA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA 190
9.5.1. Análisis de resultados – parámetros de campo 190
9.5.2. Análisis de resultados – parámetros de laboratorio 200
9.5.3. Hidrogeoquímica 231

10. RED DE MONITOREO DE CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA 240

10.1. IMPORTANCIA DE LA RED DE MONITOREO 240
10.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA RED DE MONITOREO 241
10.3. VALIDACIÓN GEOESTADÍSTICA DE LA RED DE MONITOREO PRELIMINAR 245
10.4. ESTRATEGIAS PARA LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA RED DE MONITOREO 248
10.4.1. Monitoreo de cantidad (niveles) 249
10.4.2. Monitoreo de calidad 250
10.4.3. Estrategias administrativas de operación y mantenimiento 253
10.4.4. Análisis de costos 254

11. SEGUNDO TALLER REGIONAL 258

12. DIRECTRICES PARA EL USO Y PROTECCIÓN DE FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA A NIVEL LOCAL 265

12.1. PRINCIPALES PROBLEMÁTICAS PARA EL USO Y GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA 265
12.2. OBJETIVOS 266
12.3. DIRECTRICES PARA EL USO DEL RECURSO SUBTERRÁNEO 267

13. CONCLUSIONES 274

14. RECOMENDACIONES PARA EL ESCALAMIENTO EN LA CUENCA AMAZÓNICA 279

15. CONTROL DE ANEXOS 281

16. REFERENCIAS 282

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS, 2023. Mapa base: Maxar (2018-2022).....21
Figura 2. Flujograma metodológico general del proyecto. Fuente: OTCA &SHI SAS (2023). 23
Figura 3. Distribución espacial de la geología regional. Planchas SB-19 Juruá y 526-Leticia. Adaptado de CPRM (2006) y SGC (2011). Mapa base: Maxar (2018-2022).....25
Figura 4. Correlación estratigráfica entre los diferentes estudios en la zona entre Colombia, Brasil y Perú. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....27
Figura 5. Distribución espacial de la geología local. Adaptado de García-Romo (2008), CPRM (2006) y SGC (2011). Mapa base: Maxar (2018-2022).....28
Figura 6. Distribución espacial de las provincias hidrogeológicas (PHA-Amazonas Brasil, Provincia Vaupés-Amazonas Colombia). Generado a partir de IDEAM (2015) y ANA (2015b). 32
Figura 7. Distribución espacial de los sistemas acuíferos identificados para el área de estudio. Generado a partir de IDEAM (2015) y ANA (2015b).....33
Figura 8. Distribución espacial de las unidades hidrogeológicas. Generado a partir García-Romo (2008) y ANA (2015c). Mapa base: Maxar (2018-2022).....35
Figura 9. Distribución espacial de los modelos de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero GOD. Tomado y adaptado de ANA (2015c) y OTCA&SHI SAS(2015). Mapa base: Maxar (2018-2022).....37
Figura 10. Distribución espacial de los puntos de agua. Línea base a partir de García-Romo (2008), ANA (2015c) y OTCA& SHI SAS (2015). Mapa base: Maxar (2018-2022).....40
Figura 11. Estado de los puntos de agua subterránea del acuífero aluvial transfronterizo Leticia – Tabatinga. Adaptado de (OTCA & SHI SAS, 2015) y ANA, (2015c).....42
Figura 12. Uso de agua en los puntos del acuífero aluvial transfronterizo Leticia – Tabatinga. Análisis a partir del registro de 1055 puntos de Leticia y 121 de Tabatinga. Modificado de (OTCA & SHI SAS, 2015) y ANA, (2015c).....43
Figura 13. Caudales de extracción de aguas subterráneas en pozos de las zonas urbanas de Tabatinga y Leticia. Modificado de (OTCA & SHI SAS, 2015) y ANA, (2015c).....44
Figura 14. Ciclo anual del balance hídrico en una zona homogénea del área de estudio para un periodo normal de lluvias y resumen de la recarga potencial directa promedio para diferentes condiciones hidrológicas. Adaptado de (Vélez & Bastidas, 2018).....46
Figura 15. Captura de pantalla a la asistencia virtual. Reunión de Microsoft Teams. 13/09/2022. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....49
Figura 16. Distribución espacial de los puntos de agua inventariados. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-20.....53
Figura 17. Análisis de las profundidades de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....57
Figura 18. Apariencia observada de las aguas en las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....59
Figura 19. Colores observados de las aguas en las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....60
Figura 20. Olor percibido de las aguas en las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....60

Figura 21. Análisis del pH de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 64
Figura 22. Distribución espacial del pH de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 65
Figura 23. Análisis de la temperatura de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 66
Figura 24. Distribución espacial de la temperatura de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 67
Figura 25. Análisis del oxígeno disuelto de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 68
Figura 26. Distribución espacial del oxígeno disuelto de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 69
Figura 27. Análisis de la conductividad eléctrica y solidos disueltos totales en las captaciones inventariadas. Fuente OTCA & SHI SAS(2023). 70
Figura 28. Distribución espacial de la conductividad eléctrica de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022) 71
Figura 29. Distribución espacial de los sólidos totales de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 72
Figura 30. Potencial redox de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 73
Figura 31. Distribución espacial del potencial redox de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 74
Figura 32. Turbidez de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 75
Figura 33. Distribución espacial de la turbidez de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 76
Figura 34. Análisis porcentual de las condiciones sanitarias de la captación. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 78
Figura 35. Distribución porcentual del uso de las captaciones. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 79
Figura 36. Análisis grafico del **número de usuarios por tipo de uso**. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 82
Figura 37. Análisis gráfico de la profundidad de la captación vs. nivel freático medido en las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 84
Figura 38. Crecimiento poblacional en Leticia según los censos de 1973, 1985, 1993, 2005 y 2018. Fuente: DANE. 90
Figura 39. Variación de la tasa de crecimiento anual de la población de Leticia. Fuente: DANE. 90
Figura 40. Crecimiento poblacional en Tabatinga según los censos de 1991, 2000 y 2010. Fuente: IBGE & SEMA. 91
Figura 41. Variación de la tasa de crecimiento anual de la población de Tabatinga. Fuente: IBGE & SEMA. 92
Figura 42. Dinámica histórica de número de suscriptores al acueducto de Leticia. Fuente: SUI & USPDL. 93
Figura 43. Dinámica histórica de consumos de agua del acueducto municipal de Leticia. Fuente: SUI & USPDL. 94
Figura 44. Suscriptores al acueducto de Leticia. Fuente: SUI & USPDL. 95

Figura 45. Distribución de suscriptores al acueducto de Leticia. Fuente: SUI & USPDL.96
Figura 46. Consumos de agua del acueducto de Leticia en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL. 96
Figura 47. Distribución de consumos de agua del acueducto de Leticia en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL. 97
Figura 48. Dinámica histórica de número de suscriptores al acueducto de Tabatinga entre el 2008 y 2022. Fuente: Prefeitura de Tabatinga & COSAMA. 98
Figura 49. Dinámica histórica de consumos de agua del acueducto municipal de Tabatinga. Fuente: IBGE & COSAMA....99
Figura 50. Dinámica de consumo de agua del acueducto de Leticia para el sector residencial. Fuente: SUI & USPDL....100
Figura 51. Dinámica de consumo de agua del acueducto de Tabatinga para el sector residencial. Fuente: IBGE & COSAMA. 101
Figura 52. Dinámica de consumos de agua y suscriptores al acueducto de Leticia para el sector no residencial entre el 2003 y el 2022. Fuente: SUI & USPDL. 102
Figura 53. Dinámica de consumos de agua y suscriptores al acueducto de Tabatinga para el sector no residencial en el 2008 y el 2022. Fuente: IBGE & COSAMA. 103
Figura 54. Crecimiento poblacional a 2022 en Leticia según proyecciones del DANE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....106
Figura 55. Resultado de las diferentes proyecciones de la población hasta el año 2044 en Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....107
Figura 56. Crecimiento poblacional a 2022 en Tabatinga según algunas estimativas del IBGE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 108
Figura 57. Comparación entre las proyecciones de la población total de Tabatinga por cada método. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....109
Figura 58. Dotación neta del sector residencial para Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 111
Figura 59. Dotación neta del sector residencial para Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 111
Figura 60. Dinámica de la demanda hídrica total futura en Leticia proyectada usando los métodos aritmético y UNAL y con la tendencia DANE, bajo los 3 escenarios de análisis. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....115
Figura 61. Dinámica de la demanda hídrica total futura en Tabatinga proyectada usando el método aritmético y las estimativas del IBGE, bajo los 3 escenarios de análisis. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....115
Figura 62. Dinámica de la demanda hídrica futura subterránea total estimada para la región transfronteriza con diferentes escenarios de consumo de agua. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 118
Figura 63. Distribución porcentual de las fuentes potenciales de contaminantes del agua subterránea **identificadas a partir de información secundaria** en los municipios de Leticia y Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....121
Figura 64. Localización de las fuentes potencialmente contaminantes identificadas a partir de información secundaria. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 122
Figura 65. Localización de las fuentes potencialmente contaminantes identificadas durante el reconocimiento de campo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2028-2022). 123

Figura 66. Distribución porcentual de las fuentes potencialmente contaminantes identificadas **durante el reconocimiento de campo**. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). ..124
Figura 67. Distribución porcentual de todas las fuentes potenciales de contaminación, de fuentes primarias y secundarias, en ambas ciudades. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). ...125
Figura 68. Esquema del sistema de alcantarillado de Tabatinga. Tomado de: ANA, (2022). 134
Figura 69. Antigua Termoeléctrica de Tabatinga. Tomada de Google Earth (2022). 147
Figura 70. Zonas de extracción de material para la elaboración de ladrillos. Tomada de Google Earth (2022) 148
Figura 71. Distribución de las cargas potencialmente contaminantes de las fuentes puntuales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....152
Figura 72. Distribución de las cargas potencialmente contaminantes de las fuentes difusas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....154
Figura 73. Distribución de la carga contaminante potencial al suelo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 155
Figura 74. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero. Método GOD. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....158
Figura 75. Monitoreo de niveles estáticos en pozos de agua subterránea en Leticia, abril y junio de 2015. Fuente: OTCA & SHI SAS (2015).....160
Figura 76. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM seleccionadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....162
Figura 77. Separación del flujo base del registro de caudal del río Amazonas en la estación Nazareth para un año de precipitación normal, año 2008. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 163
Figura 78. Separación del flujo base del registro de caudal del río Amazonas en la estación Nazareth para un año de precipitación baja, año 2005. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 163
Figura 79. Separación del flujo base del registro de caudal del río Amazonas en la estación Nazareth para un año de precipitación alta, año 2009. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). .164
Figura 80. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero. DRASTIC. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....168
Figura 81. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero. DRASTIC - P. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....169
Figura 82. Peligro de contaminación del acuífero obtenido a partir de la vulnerabilidad intrínseca GOD y la clasificación de las fuentes potenciales de contaminación. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....172
Figura 83. Peligro de contaminación del acuífero obtenido a partir de la vulnerabilidad intrínseca DRASTIC y la clasificación de las fuentes potenciales de contaminación. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....174
Figura 84. Distribución de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 182
Figura 85. Mapa de localización de los pozos donde se realizó medición de nivel piezométrico. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....186
Figura 86. Superficie potenciométrica a partir de valores medidos en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).....189
Figura 87. pH en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....192
Figura 88. Concentración de oxígeno disuelto en los 60 puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....193

Figura 89. Distribución espacial del pH [unidades de pH]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 194
Figura 90. Distribución espacial de la concentración de oxígeno disuelto [mg/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 195
Figura 91. Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 196
Figura 92. Distribución espacial de la conductividad eléctrica [µS/cm]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 197
Figura 93. Temperatura en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 198
Figura 94. Distribución espacial de la temperatura [°C]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 199
Figura 95. Balance de electro – neutralidad de los puntos que conforman la red de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 200
Figura 96. Solidos disueltos totales de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 201
Figura 97. Distribución espacial de la concentración de sólidos disueltos totales [mg/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 202
Figura 98. Distribución espacial de las concentraciones de bicarbonato [mg $CaCO_3$/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 206
Figura 99. Demanda biológica de oxígeno (DBO_5) de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 208
Figura 100. Distribución espacial de la demanda biológica de oxígeno. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 209
Figura 101. Nitratos [mg NO_3/l] medidos en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 210
Figura 102. Distribución espacial de las concentraciones de nitratos [NO_3/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 211
Figura 103. Concentración de cloruro [mg Cl/l] en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 215
Figura 104. Distribución espacial de las concentraciones de cloruros [mg Cl/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 216
Figura 105. Relación aniones (meq/l) y sólidos disueltos totales (mg/l) para los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 217
Figura 106. Relación entre HCO_3^- y Cl^- en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 218
Figura 107. Relación entre Cl^- y Na^+ en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 218
Figura 108. Concentración de calcio disuelto [mg Ca/l] en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 219
Figura 109. Distribución espacial de las concentraciones de calcio [mg Ca/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 220
Figura 110. Concentración de magnesio [mg/l] en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023) 221

Figura 111. Distribución espacial de las concentraciones de magnesio [mg Ca/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 222
Figura 112. Relación entre Mg^{2+} y Ca^{2+} en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 223
Figura 113. Relación entre Ca^{2+} + Mg^{2+} vs HCO_3^- en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 224
Figura 114. Concentración de hierro total [mg/l]en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 225
Figura 115. Distribución espacial de las concentraciones de hierro total [mg/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 226
Figura 116. Concentración de manganeso [mg/l] en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 227
Figura 117. Distribución espacial de las concentraciones de manganeso [mg/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 228
Figura 118. Distribución porcentual para uso doméstico. Decreto 1076 de 2015 y la resolución 2115-2007. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 229
Figura 119. Distribución porcentual para uso doméstico colectivo. Decreto 1076 de 2015 y la resolución 2115-2007. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 230
Figura 120. Distribución porcentual para consumo humano y uso doméstico. Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 230
Figura 121. Diagrama de Stiff. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 234
Figura 122. Diagrama de Piper para las muestras de la red de monitoreo preliminar. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 235
Figura 123. Relación HCO_3^- – Na^+ para los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 239
Figura 124. Distribución espacial de los puntos propuesto de la red de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 243
Figura 125. Validación geoestadística de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022). 246
Figura 126. Resultado del índice de vecino más próximo para la red de monitoreo utilizando el software ArcGIS. Fuente: OTCA & SHI SAS, (2023). 247
Figura 127. Ciclo de monitoreo de agua subterránea. Fuente: UNECE (2006). 248
Figura 128. Resumen de la metodología “Flor de Loto”. Delimitación parcial de problemáticas y soluciones. Fuente: OTCA & SHI SAS, (2023). 264
Figura 129. Objetivos de desarrollo sostenibles clave para el escalamiento. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 279

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Foto 1. Registro multimedia de la primera reunión de coordinación con actores regionales. Reunión presencial. Hotel Anaconda-Leticia-Colombia. 13/09/2022. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 49
Foto 2. Ejemplo de captación con construcción adicional elevada. Punto de acumulación para distribución. PZ-DM-07. Leticia, Colombia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 58

Foto 3. Punto de captación para uso doméstico directo. PZ-NM-52. Tabatinga, Brasil. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....58
Foto 4. Sistema de bomba sumergible automatizado. PZ-NM-12. Leticia, Colombia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....80
Foto 5. Sistema de extracción por motobomba e infraestructura de almacenamiento. PZ-NM-51. Tabatinga, Brasil. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 80
Foto 6. Extracción manual en aljibe. PZ-DM-02. Leticia, Colombia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 81
Foto 7. Bocatoma en la quebrada Yahuarcaca en Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 87
Foto 8. Planta de tratamiento de agua potable de Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 87
Foto 9. Tanques de almacenamiento de agua en el barrio centro de Tabatinga en el año 2017. Fuente: Prefeitura de Tabatinga (2018). 88
Foto 10. Vertimiento de aguas residuales domésticas – Punto: FC-DM-019. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....135
Foto 11. Cuerpo de agua contaminado – Punto:FC-DM-010. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 135
Foto 12. Relleno sanitario de Leticia – Punto FC-DM-001. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 138
Foto 13. Residuos sólidos dispuesto en un cuerpo de agua - FC-NM-009. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 139
Foto 14. Laguna de efluentes del relleno sanitario de Leticia – Punto FC-DM-001. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....140
Foto 15. Laguna de efluentes del antiguo botadero – Punto FC-DM-002. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 140
Foto 16. Estación de servicio– Punto FC-DM-028. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 142
Foto 17. Estación de servicio Auto Posto Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....143
Foto 18. Cementerio de Leticia “Jardines del recuerdo” –Punto FC-NM-003.Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....144
Foto 19. Cementerio Sao Lázaro de Tabatinga – FC-DM-030. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 144
Foto 20. Pozo séptico – Punto FC-NM-004. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 145
Foto 21. Planta de sacrificio abandonada – Punto FC-DM-029. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 146
Foto 22. Termoeléctrica de Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 147
Foto 23. Mojón IBGE-92555 e instalación del receptor base. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 185
Foto 24. Levantamiento de puntos con el receptor móvil. Izquierda: sitio colindante al pozo sobre el que se realizó medición de nivel; derecha: lugar alterno para medición del nivel base del terreno en pozo ubicado al interior de una edificación. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 185
Foto 25. Registro multimedia 14/06/2023. Auditorio del evento y mesa principal. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....259
Foto 26. Registro multimedia 14/06/2023. Intervenciones asociadas al proyecto. Entes coordinadores, ejecutores y unidades nacionales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....260

Foto 27. Registro multimedia 14/06/2023. Asistentes y cierre del evento. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 263

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros hidráulicos aproximados de la unidad hidrogeológica HQalTsa (OTCA & SHI SAS, 2015). 34
Tabla 2. Parámetros hidráulicos promedio del acuífero aluvial. Tomado de ANA, 2015c. 34
Tabla 3. Puntos de agua subterránea registrados según su fuente en la zona de estudio. (ANA, 2015c – OTCA&SHI, 2015 & García-Romo, 2008) 39
Tabla 4. Agenda del primer taller regional. Encuentro presencial en la ciudad de Leticia con transmisión virtual vía Microsoft Teams. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 49
Tabla 5. Resumen de la actualización del inventario de puntos de agua subterránea. Ubicación de los puntos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 54
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 61
Tabla 7. Resumen del análisis sanitario de las captaciones. Clasificación en rangos porcentuales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 77
Tabla 8. Resumen del análisis de los usuarios del recurso hídrico subterráneo en las captaciones. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 82
Tabla 9. Registro de niveles medidos durante la actualización del inventario de puntos de agua. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 83
Tabla 10. Censos de la población de Leticia. Fuente. DANE. 89
Tabla 11. Censos de la población de Tabatinga. Fuente: IBGE & SEMA. 91
Tabla 12. Suscriptores históricos del acueducto de Leticia por sector, en el periodo 2003-2022. Fuente: SUI & USPDL. 93
Tabla 13. Suscriptores totales históricos al acueducto de Leticia en el periodo del 2003 al 2022. Fuente: SUI & USPDL. 93
. 93
Tabla 14. Consumos históricos del acueducto de Leticia por sector en el periodo 2003 -2022 en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL. 94
Tabla 15. Consumos totales históricos de agua en el acueducto de Leticia del 2003 al 2022 en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL 95
Tabla 16. Suscriptores totales históricos al acueducto de Tabatinga entre el 2008 y el 2022. Fuente: Prefeitura de Tabatinga & COSAMA. 98
Tabla 17. Consumos totales históricos de agua en el acueducto de Tabatinga entre el 2008 y 2022 en m^3/año. Fuente: IBGE & COSAMA. 99
Tabla 18. Suscriptores del acueducto de Leticia entre el 2003 y el 2022 para el sector residencial. Fuente: SUI & USPDL. 99
Tabla 19. Consumos de agua del acueducto de Leticia entre el 2003 y el 2022 para el sector residencial en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL 100
Tabla 20. Consumos de agua y suscriptores al acueducto de Tabatinga para el sector residencial entre el 2008 y el 2022. Fuente: IBGE & COSAMA. 101
Tabla 21. Consumos de agua y suscriptores al acueducto de Leticia para el sector no residencial entre el 2003 y el 2022. Fuente: SUI & USPDL. 102

Tabla 22. Consumos de agua y suscriptores al acueducto de Tabatinga para el sector no residencial en el 2008 y el 2022. Fuente: IBGE & COSAMA. 103
Tabla 23. Escenarios considerados para el cálculo de la demanda futura de agua. Fuente: OTCA & SHI S.A.S. (2023). 104
Tabla 24. Escenarios considerados para el cálculo de la demanda futura de agua subterránea. Fuente: OTCA & SHI S.A.S. (2023). 104
Tabla 25. Población total proyectada de Leticia al 2044. Fuente: OTCA & SHI S.A.S (2023). 105
Tabla 26. Población total de Leticia proyectada a 2022 por diversos métodos, comparados con los datos del DANE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 106
Tabla 27. Población proyectada a 2044 en Leticia usando diversos métodos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 106
Tabla 28. Población total proyectada de Tabatinga al 2044. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 107
Tabla 29. Población total de Tabatinga proyectada a 2022 por diversos métodos, comparados con estimativas del IBGE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 108
Tabla 30. Población proyectada a 2044 en Tabatinga usando diversos métodos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 109
Tabla 31. Dotaciones neta y bruta para el sector residencial de Leticia entre el 2003 y el 2022. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 110
Tabla 32. Dotaciones neta y bruta para el sector residencial de Tabatinga entre el 2008 y el 2022. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 110
Tabla 33. Demanda hídrica total en Leticia bajo los 3 escenarios de análisis utilizando el método aritmético. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023) 113
Tabla 34. Demanda hídrica total en Leticia bajo los 3 escenarios de análisis utilizando el método UNAL. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 113
Tabla 35. Demanda hídrica total en Leticia bajo los 3 escenarios de análisis utilizando las proyecciones de la población del DANE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 114
Tabla 36. Demanda hídrica total en Tabatinga bajo los 3 escenarios de análisis utilizando el método aritmético. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023) 114
Tabla 37. Demanda hídrica total en Tabatinga bajo los 3 escenarios de análisis utilizando la proyección del IBGE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 114
Tabla 38. Demanda hídrica total futura en la región transfronteriza bajo los 3 escenarios de análisis. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 116
Tabla 39. Demanda hídrica subterránea actual de agua en la región transfronteriza calculada a partir de los 3 métodos definidos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 117
Tabla 40. Demanda hídrica total y subterránea actual (2022) considerando diversos escenarios y proyecciones. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 117
Tabla 41. Demanda futura de agua subterránea en la región transfronteriza. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 117
Tabla 42. Inventario de las fuentes potencialmente contaminantes caracterizadas en campo - Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 126
Tabla 43. Inventario de las fuentes potencialmente contaminantes caracterizadas en campo - Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 131
Tabla 44. Parámetros fisicoquímicos de los puntos de vertimiento y cuerpos de agua contaminados. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 136

Tabla 45. Clasificación de las cargas potenciales de contaminación de las fuentes difusas y lineales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 149
Tabla 46. Clasificación de las cargas potenciales de contaminación de las fuentes puntuales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 150
Tabla 47. Radio de influencia para cada tipo de actividad contaminante. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 151
Tabla 48. Ponderadores empleados según la ocurrencia del agua subterránea. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 156
Tabla 49. Ponderadores empleados según el tipo de substrato litológico. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 157
Tabla 50. Ponderadores empleados según la profundidad del nivel del agua. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 157
Tabla 51. Valoración de la profundidad del agua subterránea del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 159
Tabla 52. Comparación de desniveles entre abril y junio 2015. Fuente: OTCA & SHI SAS, (2015). 160
Tabla 53. Estaciones hidrometeorológicas seleccionadas para la descarga de los datos de caudal y precipitación. Fuente: IDEAM. 161
Tabla 54. Resultados de estimación de la recarga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 164
Tabla 55. Valoración de la recarga neta del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 164
Tabla 56. Valoración de la litología del medio acuífero del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 165
Tabla 57. Valoración del tipo de suelo del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 165
Tabla 58. Valoración de la pendiente del terreno del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 165
Tabla 59. Valoración de la naturaleza de la zona no saturada del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 166
Tabla 60. Valoración de conductividad hidráulica del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 166
Tabla 61. Factores de ponderación del método DRASTIC. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 166
Tabla 62. Matriz para evaluar el peligro a la contaminación de los acuíferos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 170
Tabla 63. Coordenadas de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 179
Tabla 64. Información geográfica del mojón disponible en la red geodésica del IGAC (coordenadas convertidas a época 2022.10). Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 184
Tabla 65. Resumen de valores altimétricos obtenidos mediante GNSS con técnica RTK Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 187
Tabla 66. Parámetros fisicoquímicos medidos en campo de los puntos de monitoreo preliminar. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 190
Tabla 67. Resultados laboratorio de alcalinidad, carbonatos y bicarbonatos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 203
Tabla 68. Nitratos, coliformes termotolerantes, coliformes totales y E. Coli en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 212

Tabla 69. Clasificación de las aguas subterráneas de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....236
Tabla 70. Localización de los puntos propuestos de la red de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 244
Tabla 71. Costos aproximados del escenario 1 en USD-muestreo manual. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).....255
Tabla 72. Costos aproximados del escenario 2. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 256
Tabla 73. Costeo aproximado de muestreo hidroquímico. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 256
Tabla 74. Costeo aproximado de la construcción de piezómetros. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). 257
Tabla 75. Agenda del segundo taller regional. Encuentro presencial en el IFAM – Campus Tabatinga, Brasil. Fuente: OCTA & SHI SAS (2023). 258
Tabla 76. Indicadores para el monitoreo del recurso hídrico subterráneo. Fuente: Modificado de ANA (2019). 268

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

- ABNT: Asociación Brasileña de Normas Técnicas
- ACPM: Aceite combustible para motores
- AM: Código del estado del Amazonas
- ANA: Agencia Nacional del Agua y Saneamiento Básico (Brasil)
- ANN: Vecino más próximo, en inglés: "*Average Nearest Neighbour".*
- API: Instituto Estadounidense del Petróleo, en inglés *"American Petroleum Institute"*
- ATAS: Acuífero Transfronterizo Amazonas
- CAFAMAZ: Caja de Compensación Familiar del Amazonas
- CE: Conductividad Eléctrica (Parámetro fisicoquímico).
- CORPOAMAZONIA: Corporación para el Desarrollo Sostenible del sur de la Amazonía (Colombia).
- CONAMA: Consejo Nacional del Medio Ambiente (Brasil).
- COSAMA: Compañía de Saneamiento del Amazonas (Brasil).
- COT: Carbono Orgánico Total
- CPRM: Servicio Geológico de Brasil
- DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (Colombia)
- DBO: Demanda Bioquímica de Oxigeno
- DGIRH: Dirección de la gestión integral del recurso hídrico (Colombia).
- DIMAR: Dirección General Marítima (Unidad Regional Colombia)
- DQO: Demanda Química de Oxígeno
- DRASTIC: Método de Vulnerabilidad a la contaminación de Acuíferos por sus siglas en inglés (D (depth to groundwater); R (net recharge); A (aquifer media); S (soil media); T (topography); I (impact of the vadose zone); C (hydraulic conductivity))
- EMPUAMAZONAS SA: Empresa de servicios públicos de Leticia. (Sociedad Anónima) (Colombia)
- ESPRI: Departamento de Policía del Amazonas - Comando Amazonas (Colombia)
- FIDIC: Fundación Instituto de Inmunología de Colombia
- FUNIAS: Formato Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua Subterránea (Colombia)
- GAAMA: Grupo Aéreo del Amazonas -Fuerza Aérea Colombiana.
- GEF: en inglés: "*Global Environment Facility"*
- GEO: Geología (Grupo temático de información)
- GIRH: Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
- GNSS: Sistema global de navegación por satélite. En inglés: "*Global Navigation Satellite System"*
- GOD: Método de Vulnerabilidad a la contaminación de Acuíferos por sus siglas en inglés (G- groundwater ocurrence; O - overall acuifer class; D - depth)
- GPS: Sistema de posicionamiento global, en inglés: *"Global Position System"*
- IBAMA: Instituto Brasileño del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables
- IBGE: Instituto Brasileño de Geografía y Estadística.
- IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Colombia)
- IFAM: Instituto Federal del Amazonas (Brasil)

- IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Colombia)
- INGEMMET: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú
- INGEOMINAS: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras
- INMETRO: Instituto Nacional de Metrología, Normalización y Calidad Industrial en Brasil.
- IPAAM: Instituto de Protección Ambiental del Amazonas (Brasil).
- MADS: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2010 - 2016) (Colombia)
- MAVDT: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia
- MHC: Modelo Hidrogeológico Conceptual
- MIDR: En portugués *"Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional"*
- MinAmbiente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia)
- MMA: en portugués *"Ministério de Meio Ambiente e Mudança do Clima"*
- MPS: Ministerio de la Protección Social
- MVCT: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (Colombia)
- NA – N/A: No aplica
- NBR: Norma Brasileña
- NMP: Número más probable
- NTC: Norma Técnica Colombiana
- NTU: Unidad de Turbidez Nefelométrica. En inglés "*Nephelometric Turbidity Unit*"
- ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
- OEA: Organización de los Estados Americanos
- OMS: Organización Mundial de la Salud
- ONG: Organización No Gubernamental
- ORA: Observatorio Regional Amazónico
- OTCA: Organización del Tratado de Cooperación Amazónica
- PAE: Programa de Acciones Estratégicas
- PERH: Plan estatal de recursos hídricos (Brasil).
- PET: Polietileno Tereftalato
- pH: Potencial de Hidrógeno (Parámetro fisicoquímico)
- PMSB: Plan municipal de saneamiento básico (Brasil).
- PNUMA: Programa de las Naciones Unidad para el Medio Ambiente
- POSH: Origen Contaminante y Sobrecarga Hidráulica. En inglés: *"Pollutant Origin and Hydraulic Surcharge"*
- PPK: levantamiento Cinemático diferencial con Postprocesamiento
- PRORADAM: Proyecto Radargramétrico del Amazonas
- PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable
- PTARI: Planta de tratamiento de aguas residuales industriales
- PVC: Policloruro de vinilo
- RAS: Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico de Colombia
- REDOX: Reacción de oxido-reducción
- RESPEL: Registro de generadores de residuos o desechos peligrosos
- RIMAS: en portugués *"Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas"*
- SAA: Sistema Acuífero del Amazonas

- SAAB: Sistema Acuífero del Amazonas en Brasil
- SAGA: Sistema Acuífero Grande Amazonas
- SAS: Sistema Acuífero de Solimões
- SAT: Sistema Acuífero Tikuna
- SD: Distancia estándar, en inglés: *"Standard Distance"*
- SDT: Sólidos Disueltos Totales
- SEINFRA: secretaria de Estado e Infraestructura de la región Metropolitana de Manaos (Brasil).
- SEMA: Secretaría de Estado de Medio Ambiente del Amazonas (Brasil)
- SENA: Servicio Nacional de Aprendizaje
- SEV: Sondeo Eléctrico Vertical
- SGC: Servicio Geológico Colombiano
- SGS: Sociedad General de Vigilancia. En francés: *"Société Générale de Surveillance"*
- SHI SAS: Servicios Hidrogeológicos Integrales SAS.
- SIAB: Sistema de Información de Atención Básica (Brasil).
- SIAGAS: Sistema de Información de Aguas Subterráneas (Brasil).
- SIC: Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia
- SIG: Sistema de Información Geográfica
- SINCHI: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Colombia)
- SNIS: Sistema de informaciones sobre saneamiento básico (Brasil).
- SP/OTCA: Secretaría Permanente de la OTCA
- SQL: Lenguaje de consulta estructurada. En inglés: *"Structured query language"*.
- SUI: Sistema Único de Información (Colombia).
- TdR: Términos de Referencia.
- UASB: Manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente. En inglés: *"Upflow Anaerobic Sludge Blanket"*.
- UCR: Unidad de Coordinación Regional.
- UEA: Universidad del Estado del Amazonas.
- UNAL: Universidad Nacional de Colombia.
- UNCP: Unidades Nacionales de Coordinación del Proyecto.
- UNECE: Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa.
- UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- USD: Dólar americano
- USPDL: Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios de Leticia
- USGS: Servicio Geológico de Estados Unidos, en inglés: *"United States Geological Survey"*.
- UTM: Universal Transversal De Mercator

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Altura elipsoidal:** Son las obtenidas directamente por las técnicas de posicionamiento global (GPS o GNSS) y definen la distancia vertical desde un punto sobre la superficie terrestre y una superficie de referencia, en este caso el elipsoide asociado.
- **Elevación:** Distancia vertical desde un punto sobre la superficie terrestre y el nivel medio del mar, en el caso de la geodesia el nivel medio es representado por el geoide.
- **Elipsoide:** En geodesia conocido como elipsoide de revolución (esfera achatada en los polos), es un modelo matemático de la Tierra de forma más regular que la misma, siendo el elipsoide WGS84 el datum de referencia aceptado internacionalmente.
- **Geodesia:** Ciencia que estudia la forma y tamaño de la tierra, así como las posiciones sobre la misma.
- **Geoide:** Modelo físico – matemático que representa una mejor aproximación de la forma de la Tierra, al considerar el campo de gravedad terrestre y su potencial gravitatorio, representando el nivel medio del mar. Existen diversos modelos globales tales como el EGM 2008 y locales como el GEOCOL 2004 (oficial de Colombia).
- **GNSS:** Sistema de Navegación por Satélite (Global Navigation Satelite System) que permite establecer coordenadas y elevaciones (posición) de un punto sobre la superficie terrestre a partir de las constelaciones de satélites artificiales NAVSTAR (GPS), GLONASS y GALILEO.
- **GPS:** Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System) de los EE. UU que permite establecer coordenadas y elevaciones (posición) de un punto sobre la superficie terrestre a partir de una constelación de 24 satélites artificiales denominada NAVSTAR.
- **PART:** Código desarrollado por el servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) para separar flujo base de series de caudal en cuerpos de agua.
- **PDOP:** Posición de dilución de precisión. Se trata de la imprecisión tridimensional. Es inversamente proporcional al área del polígono delimitado por las intersecciones de las líneas de visión a los satélites con una esfera centrada en el observador, por lo tanto, las peores posiciones son aquellas con los satélites muy cerca en el cielo, o situados en línea.
- **RTK:** Tiempo real cinemático (Real Time Kinematic) es un tipo de levantamiento GNSS en el que se obtiene una posición de manera autónoma que es corregida con un receptor base localizado en un punto del que se conocen las coordenadas. Se requiere una conexión, generalmente vía radio, entre los receptores.

1. INTRODUCCIÓN

Mediante el CONTRATO DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS – GEF/MC/ 650 /2023 entre la Secretaría Permanente de la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica - SP/OTCA, organismo internacional y la empresa Servicios Hidrogeológicos Integrales SHI SAS, firma consultora, se da inicio al estudio que tiene una duración de 12 meses, entre el 7 de julio de 2022 hasta el 7 de julio de 2023, con el objeto de realizar la "Evaluación hidrogeológica, de vulnerabilidad y de riesgo para el desarrollo de políticas de protección y uso de aguas subterráneas para la región transfronteriza de Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil)" en el marco del Proyecto "Cuenca Amazónica - Implementación del Programa de Acciones Estratégicas para Asegurar el Manejo Integrado y Sostenible de los Recursos Hídricos Transfronterizos en la Cuenca del Río Amazonas Considerando la Variabilidad Climática y el Cambio Climático" (OTCA/PNUMA/GEF). La agencia financiadora del proyecto es el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF), la agencia Implementadora es el PNUMA y la agencia ejecutora es la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica –OTCA.

De acuerdo con los Términos de Referencia (TdR) que hacen parte integral del contrato, el proyecto marco tiene como objetivo principal avanzar en la implementación del Programa de Acciones Estratégicas (PAE) acordado por los 8 países miembros de la OTCA, promoviendo la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). La iniciativa regional impulsará acuerdos previos de los países amazónicos que resultaron en una visión compartida y una estrategia común para la GIRH contenida en el citado Programa de Acciones Estratégicas-PAE. En este contexto, el proyecto apoyará a los países para fortalecer la capacidad nacional y la gobernanza regional para la GIRH, mejorar la adaptación al cambio climático y garantizar datos regionales sólidos para mejorar la toma de decisiones y la coordinación sobre la gestión de los recursos hídricos de la Cuenca Amazónica, desde las fuentes del Amazonas en los Andes hasta el delta del río en el Atlántico, para un ecosistema amazónico más saludable.

Para esta intervención binacional, los objetivos por alcanzar durante la ejecución del contrato y en los TdR por parte de SHI SAS son los siguientes:

- Actualizar y ampliar la línea base de la demanda de agua subterránea, con base en la complementación del inventario de puntos de agua existentes en las ciudades de Leticia y Tabatinga.
- Diseñar una red de monitoreo de calidad y niveles del agua subterránea, implementarla con por lo menos una campaña de monitoreo, y definir una estrategia para darle continuidad a su operación en el tiempo.
- Actualizar la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación para el acuífero binacional, con la metodología más apropiada en razón a la información actualizada.
- Actualizar y complementar la identificación, caracterización y valoración de fuentes potenciales de contaminación (posibles cargas contaminantes al acuífero).
- Realizar un análisis de riesgos de contaminación del acuífero (Riesgo = Peligro del Banco Mundial 2007 elaborada por Foster & Hirata (1988) y vulnerabilidad a la contaminación).
- Definir una estrategia para mitigación de los riesgos de contaminación evidenciados.

- Definir un conjunto de pautas locales para el uso y protección de fuentes de aguas subterráneas (áreas de recarga) como insumo para el desarrollo de una política binacional de gestión de aguas subterráneas.

La caracterización hidrogeológica del medio se construyó a partir de la integración de las diferentes fuentes de información secundaria se presenta en el capítulo 4; los resultados asociados a la identificación de actores y los resultados de la realización del primer y segundo taller regional se presentan en los capítulo 5 y11; la actualización del inventario de puntos de agua en las regiones de Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil) se analiza en profundidad en el apartado 6; el cálculo de la demanda de agua subterránea se presenta en el capítulo 7; las actividades de diseño e inventario de fuentes potenciales de contaminación, así como la clasificación de la carga potencial al suelo, la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero y del peligro de contaminación se presentan en el capítulo 8; los resultados del monitoreo de calidad y cantidad de agua subterránea se exponen en el apartado 9; las propuestas para la operación y mantenimiento de la red de monitoreo se definen en el capítulo 10; y finalmente las directrices para el uso sostenible y la protección de las aguas subterráneas se presentan en el capítulo 12.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio del proyecto comprende la zona urbana, ampliación y parte del suelo suburbano del municipio de Leticia en Colombia y la zona urbana de Tabatinga en Brasil, como se muestra en polígono amarillo de la Figura 1.

El municipio de Leticia en Colombia cuenta con un área de 5.968 km^2, ubicado en el extremo sur del territorio colombiano en el departamento del Amazonas, sobre la margen izquierda del río Amazonas, en la frontera entre Colombia, Perú y Brasil. La localidad de Leticia se encuentra a una altitud de 96 m.s.n.m., presenta una temperatura media anual de 25,8 °C, tiene un clima húmedo tropical gran parte del año, con una topografía plana, con pendientes menores al 3% y presenta una pluviosidad promedio entre 2.500 y 3.400 mm/año (CORPOAMAZONIA, 2006). La superficie territorial por estudiar en Colombia es de 50 km^2.

Contiguo a la ciudad de Leticia se encuentra la ciudad fronteriza Tabatinga, ubicada en el extremo oeste del Estado de Amazonas, en la triple frontera Brasil-Colombia-Perú, a orillas del río Amazonas a una altitud de 73 m.s.n.m. En 2021, la población del municipio era de 71.317 habitantes, según estimaciones del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE, 2022), siendo actualmente la sexta más poblada de Amazonas (Prefeitura Municipal de Tabatinga, 2022). Posee un área de 3.239 km², no obstante, el área objeto contractual en Brasil es de 20,5 km^2.

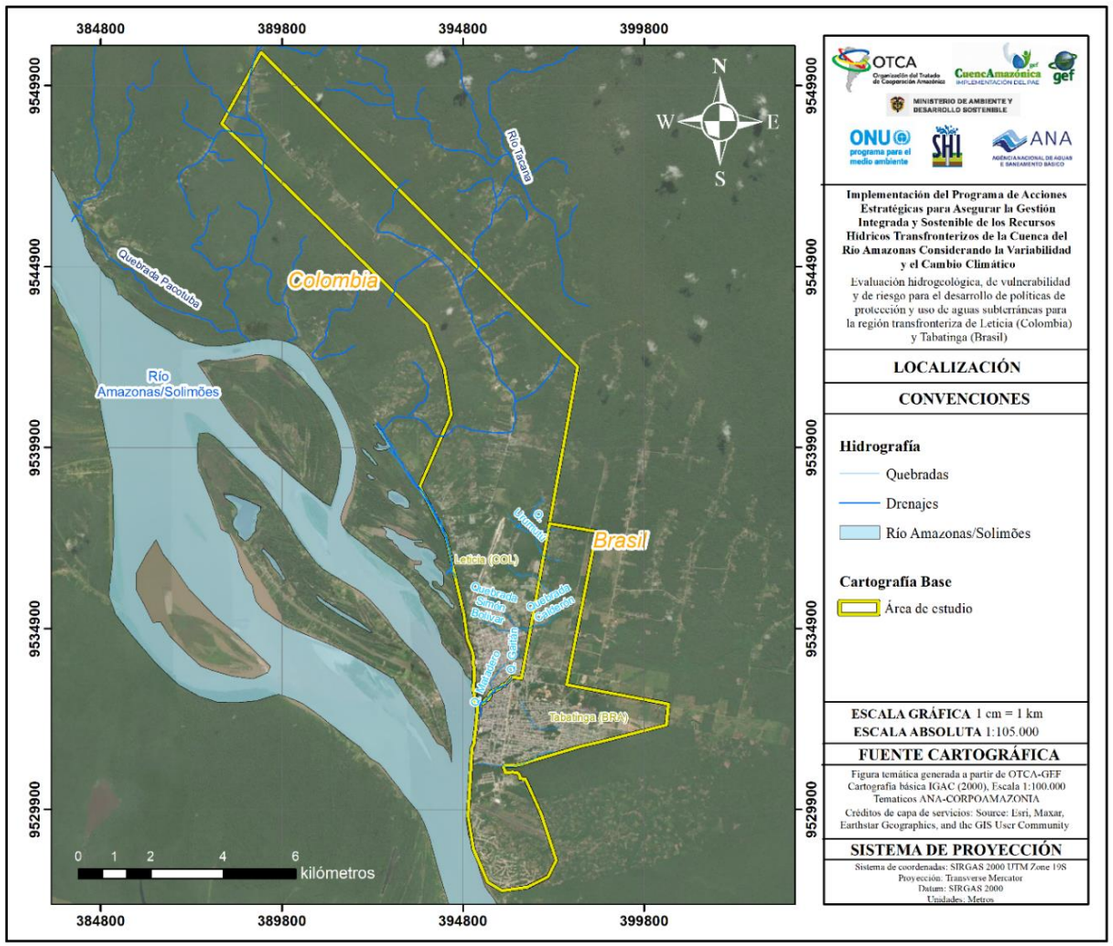


Figura 1. *Localización del área de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS, 2023. Mapa base: Maxar (2018-2022).*

3. METODOLOGÍA

La metodología que se emplea para cada producto del contrato se detalla en **Anexo_00_InformesAntecedentes** y se resume gráficamente en flujograma metodológico del proyecto presentado en la Figura 2.

Como punto de partida, al iniciar el proyecto se ejecutó una recopilación y revisión de la información disponible para el área de estudio la cual es la base del contexto hidrogeológico. Cada estudio empleado tiene asociado una ficha bibliográfica con la información relevante que permite la búsqueda y el acceso fácil de la información, resaltando los hallazgos más representativos dentro del desarrollo especifico de cada actividad (**Anexo_08_InformacionBase**).

Como resultado de la revisión bibliográfica, se realizó la identificación de actores sociales e institucionales clave para el desarrollo de los talleres de socialización y de resultados del estudio, a la luz de cumplir con los objetivos del contrato y relacionamiento constante con los actores del agua en ambos países. De este ítem se deriva la presentación de los resultados correspondientes al primer taller regional.

El inventario de puntos de agua existentes para el área de estudio se basó en las bases de datos de pozos, suministradas por la ANA- Brasil, que cuenta con 121 no concesionados y la base de datos de CORPOAMAZONIA-Colombia, que cuenta con 31 concesionados por la misma entidad. Para el inventario en Colombia se diligenció el Formato Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua Subterránea (FUNIAS), y para el inventario en Brasil se empleó el formato de Registro de Fuentes de Abastecimiento por Aguas Subterráneas (Cadastro De Fontes de Abastecimento por Águas Subterrâneas) de la ANA. La información de las características físicas del punto de agua, parámetros fisicoquímicos de campo, nivel del agua subterránea (nivel piezométrico) estático, condiciones de explotación, usos y usuarios y condiciones sanitarias de la captación y su entorno son analizadas en el capítulo inventario de puntos de agua subterránea.

Las fuentes potenciales de contaminación actuales se inventariaron simultáneamente durante el inventario de puntos de agua. Dentro de las fuentes contaminantes se incluyeron aquellas reportadas en la información secundaria disponible para el área de estudio, con el fin de tener los insumos para la estimación del peligro de contaminación (riesgo). En el capítulo de fuentes potenciales de contaminación se presenta los resultados del inventario y los análisis para la evaluación de la vulnerabilidad y del peligro (riesgo) a la contaminación del acuífero, que permite definir las estrategias para prevenir o mitigar los riesgos identificados.

Con base en los hallazgos, limitaciones y exigencias técnicas derivadas de los dos ítems anteriores, se seleccionaron 60 puntos con soporte geoestadístico necesarios para la ejecución del muestreo fisicoquímico y de calidad del agua, y en donde fue posible, la medición por medio de altimetría de precisión del nivel freático en las captaciones. Este ítem corresponde al punto de partida de las estrategias de mitigación como resultado definitivo del presente estudio.

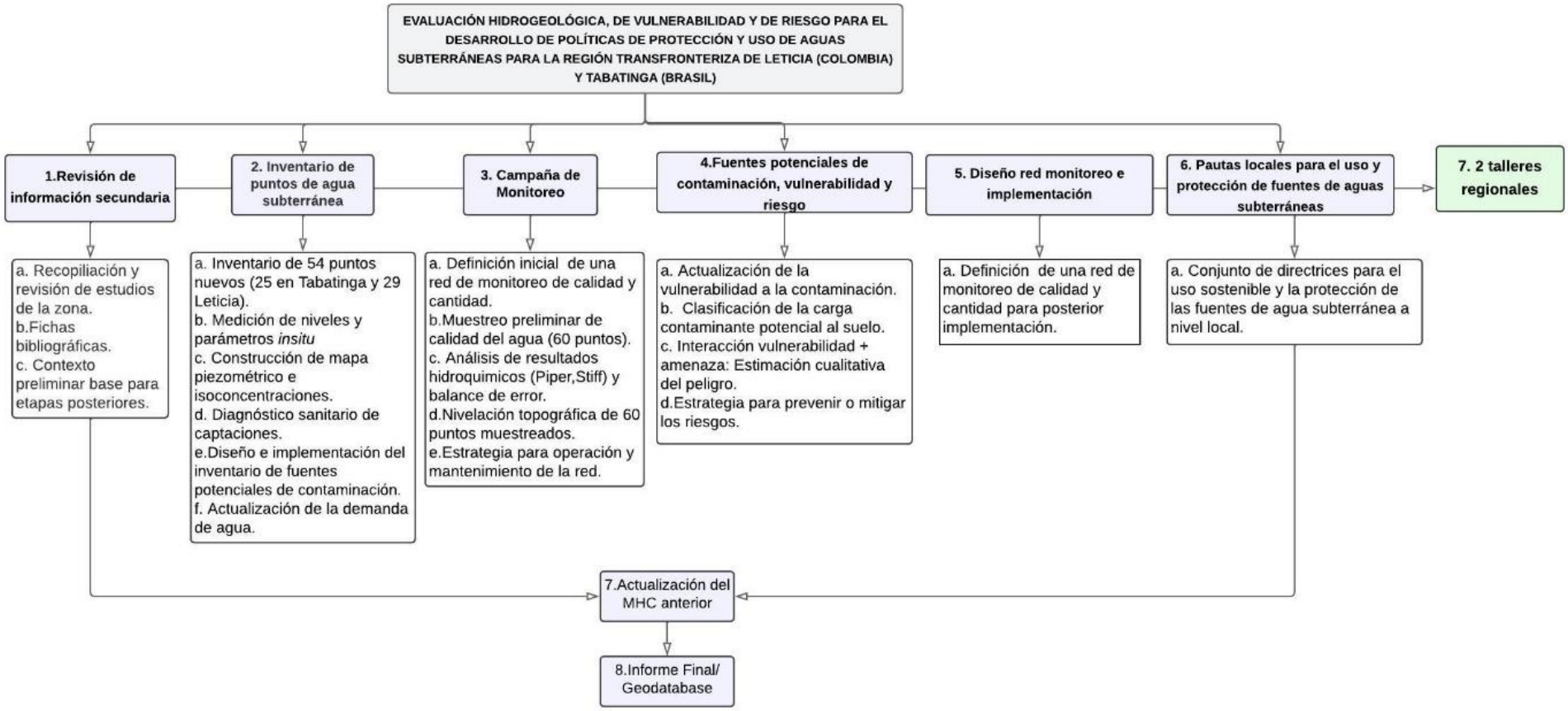


Figura 2. *Flujograma metodológico general del proyecto. Fuente: OTCA &SHI SAS (2023).*

4. REVISIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Este capítulo presenta la revisión y recopilación de la información secundaria disponible para el área de estudio, la cual será la base para la caracterización hidrogeológica del proyecto. Esta revisión incluye información sobre el contexto geológico e hidrogeológico regional y local, estudios previos sobre la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, la línea base para la elaboración del inventario de puntos de agua y el análisis sobre calidad del agua subterránea en los municipios de Leticia y Tabatinga. Cada estudio empleado en este capítulo tiene una ficha bibliográfica asociada con la información relevante, que permite la búsqueda y el acceso fácil a la información. (**Anexo_08_InformacionBase**).

4.1. Caracterización geológica

4.1.1. Contexto geológico regional

A escala regional, la zona de estudio se encuentra dentro de la cuenca Vaupés-Amazonas, considerada como una cuenca intracratónica, con una extensión aproximada de 155.000 km^2, localizada al sur de Colombia y que se extiende hasta la cuenca del Río Amazonas en Brasil, la cual cuenta con una superficie aproximada de 450.000 km^2. Ambas cuencas están conformadas por un basamento precámbrico cubierto por sedimentos cenozoicos; estos sedimentos se caracterizan por una amplia distribución espacial, siendo correlacionables las unidades ubicadas en las cuencas de Acre y Solimões en Brasil, con las unidades de la Amazonía colombiana y de la Amazonía peruana.

La base de la cuenca del río Amazonas comprende rocas del Precámbrico al Pérmico, entre las que se han identificado las formaciones Benjamin Constant, Jutaí, Grupo Marimari (Formaciones Ueré y Jandiatuba) y Grupo Tefé (Formaciones Juruá, Carauari y Fonte Boa). Las únicas unidades litológicas aflorantes en la cuenca son de edad cenozoica y comprenden las Formaciones Solimões, Içá, terrazas fluviales y depósitos de planicies aluviales. En la región de Tabatinga las unidades litoestratigráficas que han sido identificadas corresponden a la Formación Benjamin Constant, sedimentos paleozoicos indiferenciados, la Formación Javari, la Formación Solimões, la Formación Içá y depósitos holocenos (ANA, 2015c).

En la región de Colombia se han reportado rocas graníticas y gnéisicas de edad precámbrica pertenecientes al Escudo de Guayana, rocas sedimentarias de la misma edad y rocas ígneas y sedimentarias de edad paleozoica (SGC, 2011). En la zona de Leticia afloran solamente secuencias sedimentarias del mioceno, representadas por el Terciario Amazónico (denominado como Formación Pebas y Arenitas de Calderón según (SGC, 2011) y sedimentos cuaternarios, constituidos por depósitos de arena y arcilla, no consolidados, de gran extensión, que se localizan principalmente a lo largo los grandes ríos (Huguett et al., 1979).

En la Figura 3 se muestra la figura de la geología regional para la zona de estudio.

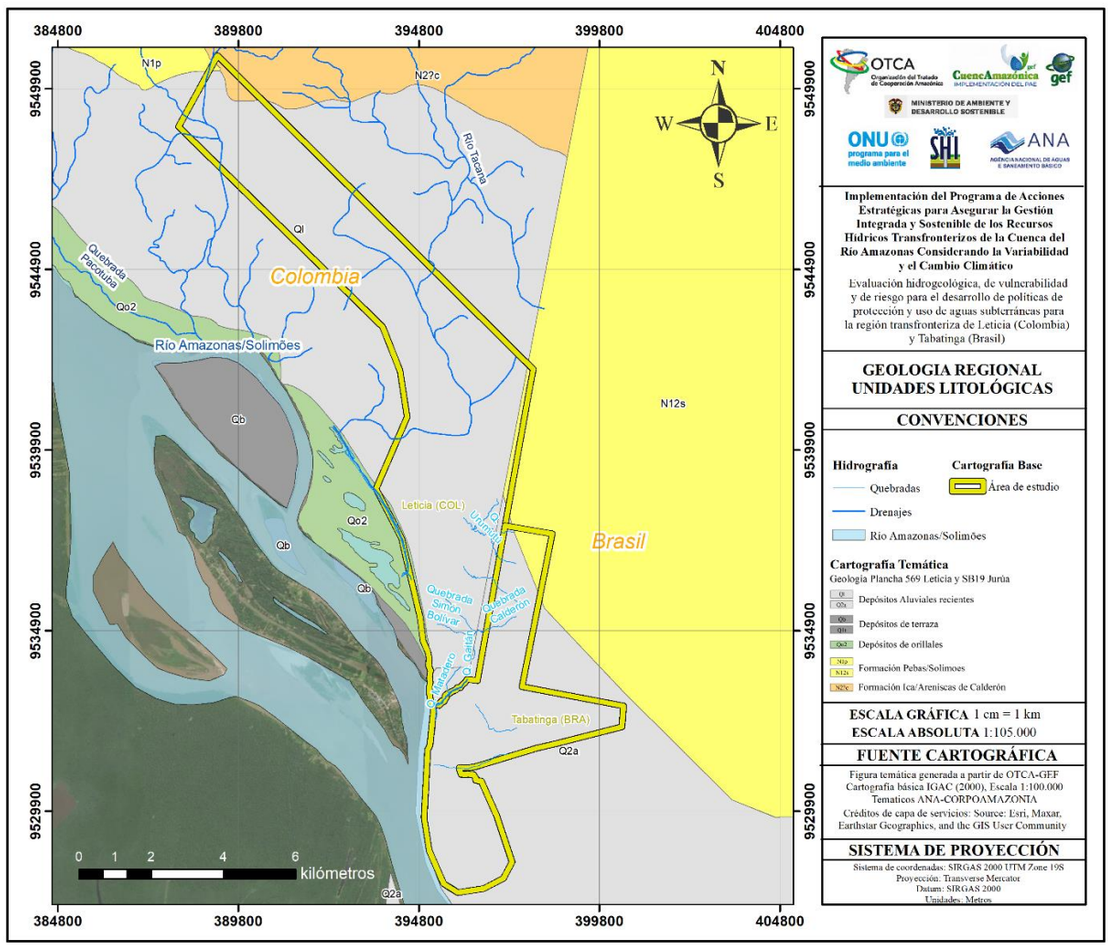


Figura 3. *Distribución espacial de la geología regional. Planchas SB-19 Juruá y 526-Leticia. Adaptado de CPRM (2006) y SGC (2011). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

4.1.2. Contexto geológico local: Leticia – Tabatinga.

Formación Pebas/Solimões:

Corresponde a una sucesión constituida por arcillolitas y lodolitas de colores azulosos, verdosos y grises, generalmente masivas, dispuestas en capas horizontales a sub-horizontales, intercaladas con capas delgadas de lignitos, donde es común la presencia de bivalvos y gasterópodos (Valenzuela, et al., 1999; SGC, 2011; ANA, 2015a). Puede alcanzar espesores de 1.000 metros en Perú y entre 335-400 metros entre Leticia, Benjamin Constant y Tabatinga (Valenzuela, et al., 1999; OTCA & SHI SAS, 2015). Su edad ha sido establecida entre el Mioceno – Plioceno (Valenzuela, et al., 1999; CPRM, 2006; SGC, 2011; ANA, 2015a).

Esta secuencia sedimentaria ha sido denominada Formación Pebas (SGC, 2011), Pebas/ Solimões (Jaramillo et al., 2011a) y Terciario Inferior Amazónico (Huguett et al., 1979) en Colombia y como Formación Solimões en Brasil (ANA, 2015a; CPRM, 2006) y puede ser correlacionable con las Formaciones Pebas e Iquitos en Perú (Valenzuela, et al., 1999).

Formación Içá:

La Formación Içá en Brasil corresponde a una secuencia sedimentaria integrada predominantemente por areniscas de tonalidades rojizas, con tamaño de grano que varía de fino a conglomerático, friables, intercaladas con estratos limolitas y arcillolitas; se ha considerado que la secuencia fue depositada en ambientes continentales a lo largo de los grandes ríos de la región. La Formación Içá se encuentra en discordancia erosiva sobre la Formación Solimões y su edad ha sido establecida entre el Plioceno y Pleistoceno (Valenzuela, et al., 1999; ANA, 2015a).

En Colombia, el Plio-Pleistoceno corresponde a una secuencia de sedimentos no consolidados de intercalaciones de arcillas y arenas finas a medias de colores rojizos, con niveles de bauxita que hacen parte de la Formación Jericó (informal) y a una faja de sedimentos no consolidados que comprenden arcillas, limos, arenas de grano fino a grueso, de tonalidades que varían entre rojo, naranja, amarillo y gris claro de la Formación Içá; en esta secuencia es común la presencia de estructuras de flujo como laminación plana paralela, estratificación cruzada e imbricación, lo que sugiere un ambiente fluvial. La Formación Jericó se considera de edad Plio-Pleistocena y descansa discordantemente sobre la Formación Solimões; la Formación Içá se ha estimado de edad Pliocena y se encuentra sobre la Formación Jericó (Jaramillo et al., 2011b).

La Formación Içá presenta características similares con la unidad informal denominada Arenitas de Calderón, compuesta por arenitas lodosas, arenitas arcillosas y arcillolitas de tonalidades rojizas (SGC, 2011), y con el Terciario Superior Amazónico (Huguett et al., 1979) en Colombia y ha sido correlacionada con la Formación Nauta -Miembro Superior en Perú (Valenzuela, et al., 1999).

Terraza de Leticia:

En la región de la Amazonía Colombiana se han reconocido niveles de terrazas que conservan su geomorfología plana original, las cuales recubren la Formación Içá y no se encuentran afectadas por la dinámica actual del Río Amazonas (Jaramillo et al., 2011a). Esta unidad está conformada por lodos, lodos arenosos y arenas de grano fino a medio, de tonalidades claras a

colores cafés y naranjas; esta secuencia se encuentra altamente bioturbada y no presenta estructuras sedimentarias (Jaramillo et al., 2011a; SGC, 2011). Se ha propuesto que su depositación ocurrió en el límite Pleistoceno-Holoceno (Jaramillo et al., 2011b).

Depósitos cuaternarios:

En la región de Brasil se pueden distinguir terrazas fluviales, que constituyen niveles topográficos más elevados respecto a las planicies aluviales actuales; están formadas por sedimentos no consolidados a semiconsolidados, compuestos por partículas tamaño arcilla, arena y grava en diversas proporciones, las cuales pueden alcanzar decenas de metros de espesor. Estas terrazas se distribuyen en la cuenca del río Amazonas a lo largo de los ríos Solimões, Juruá, Purus y Madeira y su edad es posiblemente pleistocena. Igualmente, depósitos de planicies aluviales se presentan en las cuencas del Amazonas alcanzando decenas de kilómetros de extensión; están compuestos por sedimentos arenosos a arcillosos, no consolidados a semiconsolidados, con estratificación plana-paralela y cruzada y cantidades variables de troncos y materia orgánica (ANA, 2015a).

En la Amazonía Colombiana se han caracterizado varios depósitos formados durante el holoceno. El proyecto Radargrametrico (1979) identifica arenas eólicas, las cuales presentan una distribución irregular y un espesor muy variable; terrazas aluviales, compuestas por cantos redondeados de cuarzo y chert embebidos en una matriz limo-arcillosa de color ocre; y aluviones, formados por sedimentos arcillosos, limo-arcillosos y gravas, de tonalidades rojizas y amarillentas.

De manera más específica para la región de Leticia, la plancha 569 y 569 BIS (SGC, 2011) mencionan depósitos de orillares antiguos, constituidos por intercalaciones de arenas friables y lodolitas; depósitos de orillares recientes, formados por intercalaciones de arcilla, arena-lodosa y arena, de tonos claros y con laminación inclinada y plana-paralela; y depósitos de barra de arena, que se caracteriza principalmente por arenas finas de color crema y capas de arcilla y materia orgánica en las capas superiores. Adicionalmente, Jaramillo et al., (2011a) identifica dentro de la llanura inundable actual del Río Amazonas un subsistema de canales principales y un subsistema de cordones fluviales.

En la Figura 4 se presenta la correlación estratigráfica para la zona entre Colombia, Brasil y Perú, y en la Figura 5 la distribución espacial de las unidades geológicas descritas anteriormente.

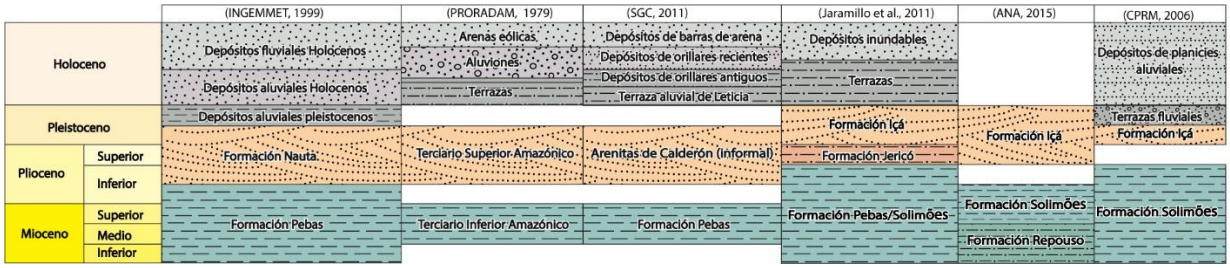


Figura 4. *Correlación estratigráfica entre los diferentes estudios en la zona entre Colombia, Brasil y Perú. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

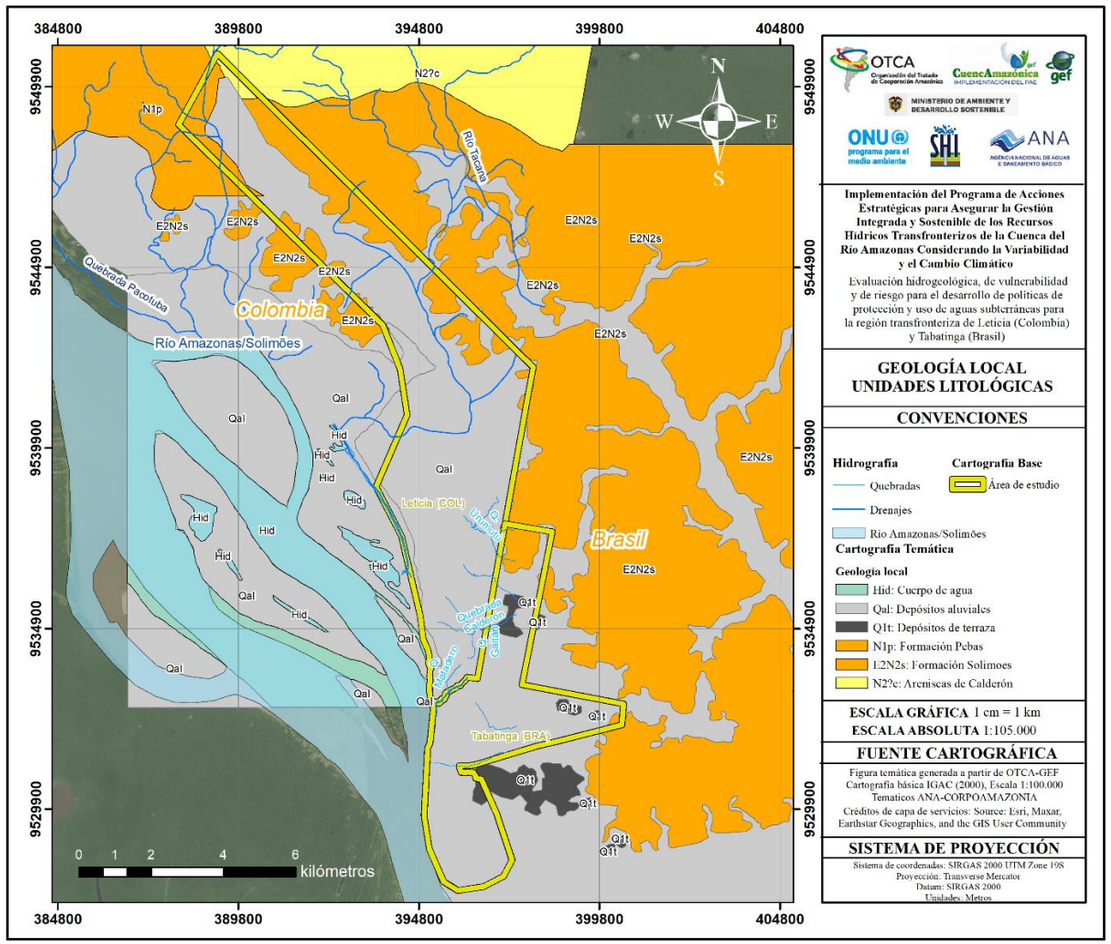


Figura 5. *Distribución espacial de la geología local. Adaptado de García-Romo (2008), CPRM (2006) y SGC (2011). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

4.2. Caracterización hidrogeológica

La existencia de un sistema acuífero único en el Amazonas, que abarca las unidades geológicas cenozoicas y cretácicas de la región ha sido ampliamente discutida en los últimos años, principalmente debido a su importancia en términos de calidad y abastecimiento para el consumo humano. A continuación, se resumen los principales trabajos sobre este tema.

En 2005 se propone, dentro del proyecto de Acuíferos Transfronterizos de las Américas (UNESCO & OEA, 2007), el Sistema Acuífero Transfronterizo Amazonas (ATAS), el cual abarca los países de Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela, y tiene una extensión aproximada de 3'950.000km^2, de los cuales 2'000.000 km^2 hacen parte de la Formación Alter do Chão y 1'200.000 km^2 a la Formación Içá. Este sistema acuífero comprende las provincias hidrogeológicas de América del Sur de Amazonas y Orinoco, conformados por subsistemas acuíferos de sedimentos consolidados y no consolidados.

En 2006, se plantea el Sistema Acuífero del Amazonas (SAA) ubicado en Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela, en donde las cuencas sedimentarias del Orinoco y Amazonas están cubiertas por sedimentos cretácicos y cenozoicos consolidados y no consolidados, que pueden alcanzar espesores de hasta 2.200 metros; este sistema agrupa los acuíferos de Javari, Jazida da Fazendinha, Alter do Chão, Solimões, Repouso e Içá, que a pesar de presentar distintas características litológicas y estratigráficas, pueden estar conectados desde el punto de vista hidrogeológico (Ferreira et al., 2006; ANA, 2015a).

En 2011, se redefine el Sistema Acuífero del Amazonas como la región occidental del SAA (Ferreira et al., 2006; ANA, 2015a), comprendida entre el arco de Purús y el cinturón de fallas subandinas. En este trabajo, el SAA es dividido en dos subsistemas acuíferos: el Sistema Acuífero de Solimões (SAS), formado por sedimentos terciarios de las formaciones Solimões y Repouso, y el Sistema Acuífero Tikuna (SAT), compuesto por rocas cretácicas de las Formaciones Capanaua, Moa, Río Azul, Divisor y Ramon de la cuenca de Acre y la Formación Javari en la cuenca del Amazonas (ANA, 2015b).

En 2013 proponen el Sistema Acuífero Grande Amazonas (SAGA), el cual comprende las unidades cretácicas y cenozoicas de las cuencas de Marajó, Amazonas, y Acre, abarcando un área de 1'305.000 km^2 y que posee reservas estimadas de 162.520 km^3 (De Abreu et al., 2013).

De forma semejante, el Sistema Acuífero del Amazonas en Brasil (SAAB) (ANA, 2015b), constituye un sistema regional, que se comporta como una unidad de flujo heterogénea, multicapa y multicuenca, compuesto por aluviones cuaternarios, y las Formaciones Barreiras, Pirabas, Tucunaré, Alter do Chão, Içá, Jazida da Fazendinha, Javari, Repouso y Solimões y unidades paleozoicas aflorantes.

En 2015, a través del proyecto GEF Amazonas: recursos hídricos y cambio climático, se realiza la caracterización hidrogeológica de los sistemas acuíferos que comprenden la región de Leticia-Colombia y Tabatinga-Brasil, de manera conjunta. En este estudio se incluye una descripción de las unidades hidrogeológicas, se definen los principales parámetros hidráulicos, se realiza el inventario de puntos de agua subterránea y de usos y usuarios, se analiza la calidad del agua subterránea, se determina la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y se

plantean medidas de mitigación del riesgo de contaminación, considerando los posibles impactos de la variabilidad y cambio climático (OTCA & SHI SAS, 2015).

4.2.1. Contexto hidrogeológico regional

En el territorio colombiano, en la región de la Orinoquía y la Amazonía, se han identificado varios sistemas acuíferos asociados a 3 provincias hidrogeológicas pericratónicas: la Provincia Hidrogeológica Caguán-Putumayo, la Provincia Hidrogeológica Vaupés-Amazonas y la Provincia Hidrogeológica Llanos Orientales. Estos corresponden a acuíferos extensos y continuos, que se han desarrollado en depósitos aluviales de gran extensión, terrazas de piedemonte, depósitos clásticos de altillanura y secuencias sedimentarias del Terciario, los cuales se correlacionan con el Sistema Acuífero Transfronterizo del Amazonas (UNESCO & OEA, 2007).

En el departamento del Amazonas se encuentra definida la provincia hidrogeológica de Vaupés-Amazonas (Figura 6), ubicada en la margen sureste del país; limita al sur con Perú, al oriente con Brasil, al occidente con la Serranía de Chiribiquete, al norte con el alto estructural de Vaupés y al nororiente con rocas metamórficas precámbricas. Litológicamente está conformada por rocas ígneas, sedimentarias, metamórficas y depósitos sedimentarios, con edades que oscilan entre el Precámbrico al Cuaternario; en esta región las secuencias sedimentarias presentan un adelgazamiento progresivo desde el occidente hasta la frontera con Brasil. Esta provincia está integrada por depósitos de valles aluviales y terrazas de grandes ríos, en los que se presentan acuíferos libres y semiconfinados, y el Sistema Acuífero de Leticia (Figura 7), conformado por el Acuífero Cuaternario (Qal) y el Acuífero Terciario Superior Amazónico (Tsa), considerados como acuíferos libres multicapa (IDEAM, 2013; IDEAM, 2015; García-González, 2013).

En Brasil se encuentra definida la Provincia Hidrogeológica del Amazonas - PHA (Figura 6), que comprende las cuencas sedimentarias de Marajó, Amazonas, Solimões y Acre, que se desarrollaron sobre el Cratón Amazónico; en esta región los acuíferos más importantes son los acuíferos de Alter do Chão, Solimões-Repouso, Içá, Aluvial, Barreiras, Pirabas, Tucunaré, Coberturas Cenozoicas de Porto Velho y Río Branco (ANA, 2015b). Por su cercanía a la zona de estudio se resaltan el acuífero de Solimões, Içá y aluvial (Figura 7).

El acuicludo Solimões, en algunos casos denominado acuífero Solimões, está localizado en el estado de Acre y en el occidente del estado de Amazonas; corresponde a una capa gruesa de arcilla, con algunas intercalaciones de lignito y areniscas y cuyo espesor que varía entre 150-180 metros (Souza, et al., 2013). Esta capa ha sido denominada como acuitardo Solimões-Repouso (ANA, 2015b), para referirse a la secuencia sedimentaria integrada por las Formaciones Solimões y Repouso, las cuales están compuestas principalmente por arcillas blandas de color gris a gris verdoso, laminadas o masivas e intercaladas con lentes finos de lignito o areniscas.

El acuífero Içá se localiza principalmente la región central del estado de Amazonas y se extiende al suroeste de Roraima, al norte de Rondônia y al noroeste de Acre. Está compuesto predominantemente por capas de areniscas finas a medianas, a veces limo/arcillosas, poco consolidadas, que alcanzan en promedio 100 metros de espesor y forman acuíferos libres y semiconfinados (ANA, 2015b). En la región de Urucu, se ha determinado el Sistema Acuífero Içá-Solimões, donde se ha observado la dificultad de separar estas dos formaciones debido a su

similitud litológica; este sistema es subdividido en dos acuíferos, los cuales pueden ser diferenciados debido a la existencia de lentes arcillosos intercalados con areniscas: un acuífero superior, ubicado entre los 20-70 metros de profundidad y uno inferior entre 80-130 metros (Souza et al., 2013; Ferreira Galvão et al., 2012).

Finalmente, el acuífero aluvial corresponde a depósitos sedimentarios constituidos por arena, limo, arcilla y grava, no consolidados a semiconsolidados, localizados en canales de ríos y llanuras aluviales; es un acuífero libre, continuo, poroso y puede presentar permeabilidades bajas, especialmente en la región de Porto Velho. Se localiza principalmente en las cuencas de Solimões y Amazonas, donde los principales ríos generan extensas áreas de planicies aluviales, alcanzando decenas de kilómetros de ancho y de largo, y con un promedio de 40 metros de espesor (ANA, 2015b; Pereira & Cajazeiras, 2012).

4.2.2. Unidades hidrogeológicas locales: Leticia – Tabatinga.

En la zona de Leticia se han definido 3 unidades hidrogeológicas principales, que se presentan distribuidas según se muestra en la Figura 8.

- **Unidad hidrogeológica HPlz:**

  Esta unidad hidrogeológica es correlacionable con rocas del basamento o cratón (Formación Araracuara y Precámbricas del Escudo Guayanés), las cuales pueden comportarse como una capa impermeable (acuífugo) según sus características litológicas y los dados los registros electro estratigráficos; además, se considera que estas unidades presentan una porosidad secundaria baja, dado que se ubican en un ambiente tectónicamente estable (García-Romo, 2008).

- **Unidad hidrogeológica HTia:**

  Esta unidad está constituida por arcillolitas pertenecientes al Terciario Inferior Amazónico, las cuales forman un sustrato impermeable y que, desde el punto de vista hidrogeológico, constituyen un acuífugo que infrayace la unidad hidrogeológica HQalTsa. Se conoce poco sobre su comportamiento hidráulico, ya que los estudios se han limitado a las zonas someras, donde aflora el acuífero aluvial (García-Romo, 2008; OTCA & SHI SAS, 2015).

- **Unidad hidrogeológica HQalTsa:**

  Corresponde a un acuífero libre, multicapa, somero, con niveles freáticos superficiales, formado por depósitos aluviales (Qal) no consolidados, compuestos principalmente por arenas y lodos que hacen parte de la Terraza de Leticia y de depósitos holocenos; y por el Terciario Superior Amazónico (Tsa), caracterizado por areniscas y conglomerados. Estas unidades litológicas han sido agrupadas en una sola unidad hidrogeológicas dado que en los registros de pozo y los sondeos eléctricos verticales (SEV) ejecutados en la zona no se han identificado capas confinantes. Tiene un espesor variable, presentando su mayor potencial hacia el área adyacente de la ciudad de Leticia, donde alcanza 70 m, y disminuye hacia el norte, presentando entre 50 y 15 m de profundidad (García-Romo, 2008; OTCA & SHI SAS, 2015).

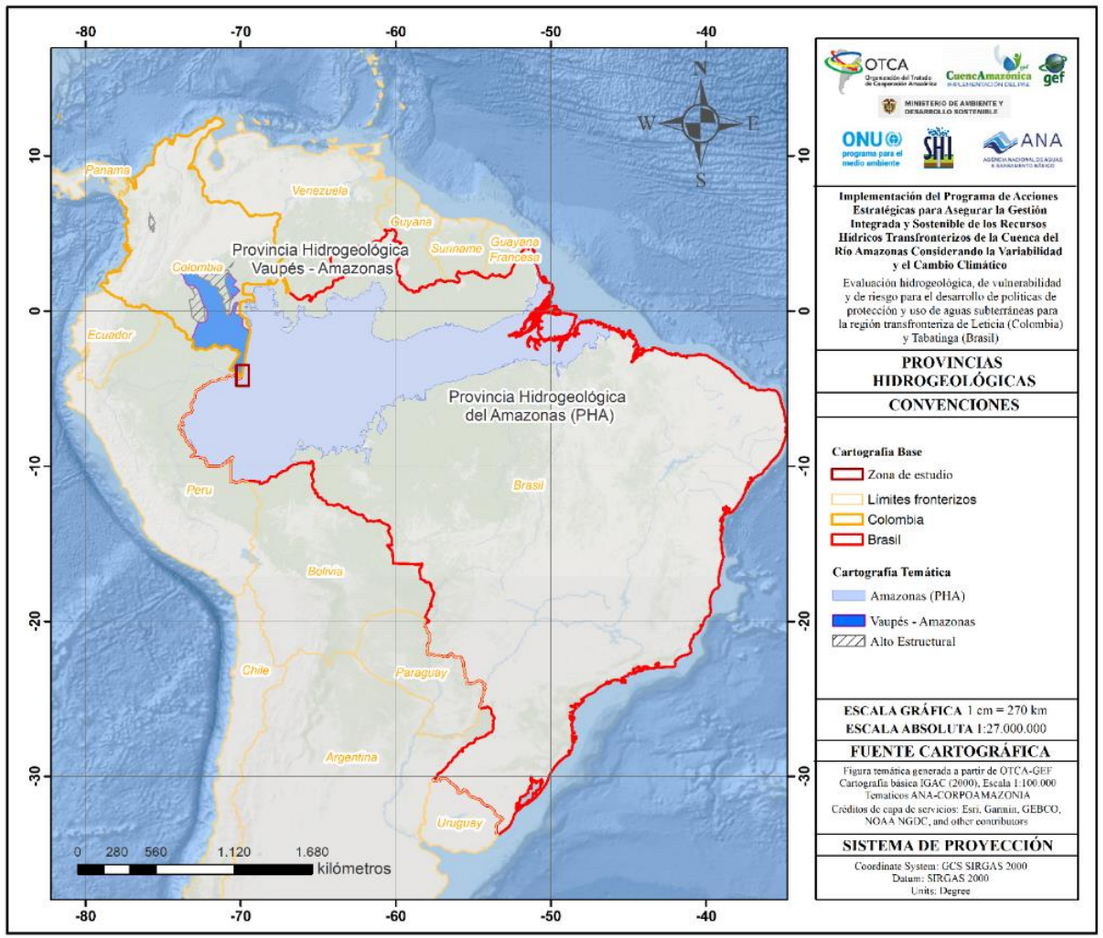


Figura 6. *Distribución espacial de las provincias hidrogeológicas (PHA-Amazonas Brasil, Provincia Vaupés-Amazonas Colombia). Generado a partir de IDEAM (2015) y ANA (2015b).*

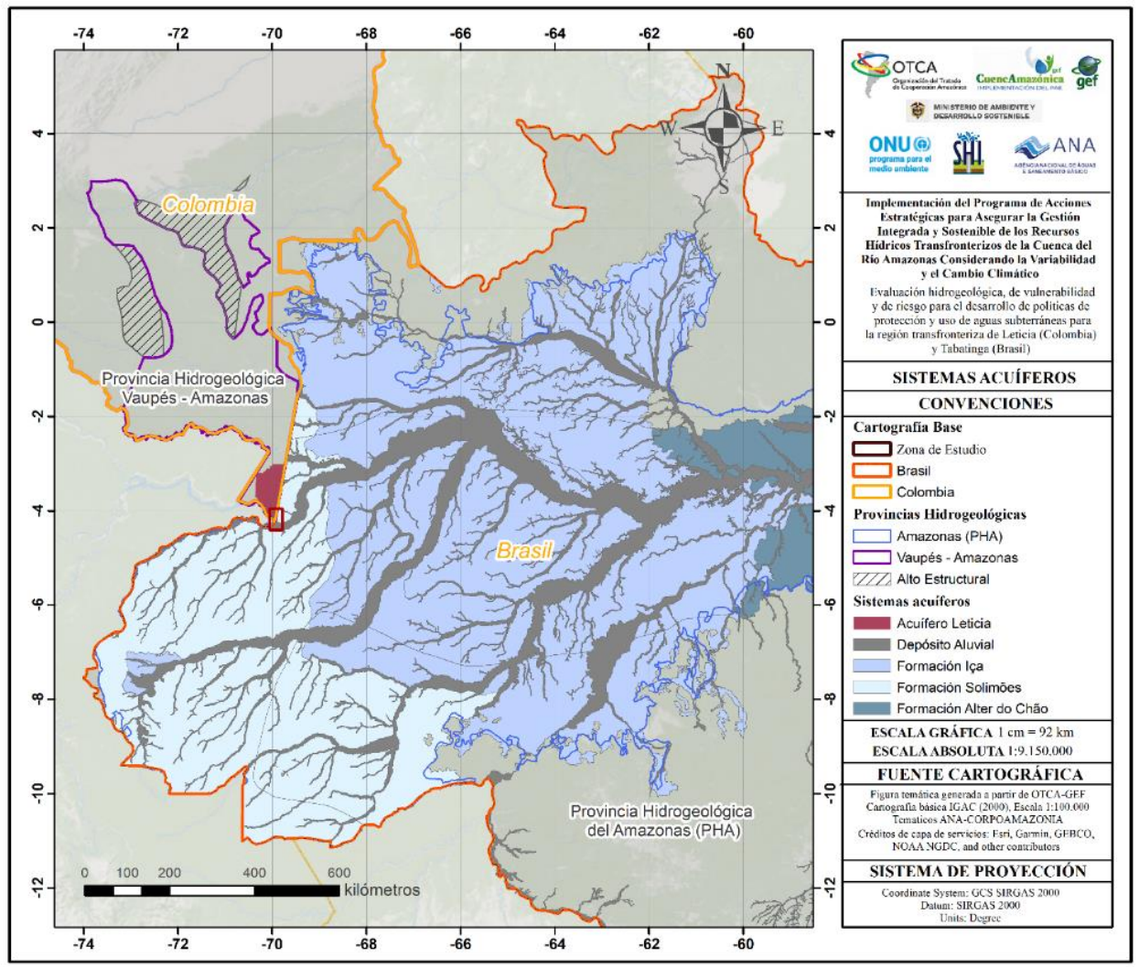


Figura 7. *Distribución espacial de los sistemas acuíferos identificados para el área de estudio. Generado a partir de IDEAM (2015) y ANA (2015b).*

En la Tabla 1 se presentan los principales parámetros hidráulicos.

Tabla 1. *Parámetros hidráulicos aproximados de la unidad hidrogeológica HQalTsa (OTCA & SHI SAS, 2015).*

Parámetro	Unidad	Magnitud
Porosidad efectiva	%	38,4
Conductividad hidráulica	m/día	1,7 – 43,2
Transmisividad*	m^2/día	700 – 2.000
Velocidad aparente	cm/día	0,04 - 1

* Definida teniendo en cuenta todo el espesor del acuífero.

Esta unidad hidrogeológica es equivalente a la denominada como sedimentos, rocas sedimentarias y vulcanoclásticas de alta a media permeabilidad por INGEOMINAS (2010), la cual abarca sedimentos arcillosos y areno-arcillosos de depósitos y llanuras aluviales, gravas y arenas de terrazas aluviales y areniscas y conglomerados del Terciario Superior Amazónico. En el área de Tabatinga se reconocen 4 unidades litoestratigráficas: depósitos aluviales y las Formaciones Içá, Solimões e Javari; estas pueden o no constituir unidades de importancia hidrogeológica (ANA, 2015c).

- **Acuífero confinado Javari:**

  Está constituido por una secuencia de areniscas y conglomerados con intercalaciones de arcillolitas, con un espesor promedio de 380 m, alcanzando hasta 500 m en la frontera con Perú; se encuentra confinado hacia la base por un basamento cristalino y al tope por sedimentos poco permeables del acuitardo Solimões. Este acuífero solo se presenta en profundidad (entre 335 – 716 m) por lo que solo puede ser captado por pozos profundos (ANA, 2015c).

- **Acuitardo / Acuicludo Solimões:**

  Corresponde a una secuencia de arcillolitas y lodolitas formando un estrato impermeable, el cual puede, en algunas zonas, transmitir agua muy lentamente.

- **Acuifero libre Içá:**

  Está compuesto principalmente por materiales arenosos los cuales alcanzan, en promedio, 20 m de espesor, y que forman un acuífero libre de poco espesor. A nivel local, se ha observado que este acuífero no está presente en la ciudad de Tabatinga.

- **Acuífero aluvial:**

  Está constituido por intercalaciones de arenas finas a medias con un espesor promedio de 14,5 m. Estos sedimentos conforman un acuífero libre, distribuido verticalmente en el rango de 5,5 a 20 m, con un espesor medio saturado de 14,5 m y el cual se localiza sobre lignitos y arcillolitas poco permeables.

En la Tabla 2 se muestran los parámetros hidráulicos promedios (ANA, 2015c).

Tabla 2. *Parámetros hidráulicos promedio del acuífero aluvial. Tomado de ANA, 2015c.*

Parámetro	Unidad	Magnitud
Espesor saturado	m	15
Porosidad efectiva	%	12
Conductividad hidráulica	m/día	0,76
Transmisividad	m^2/día	6,1

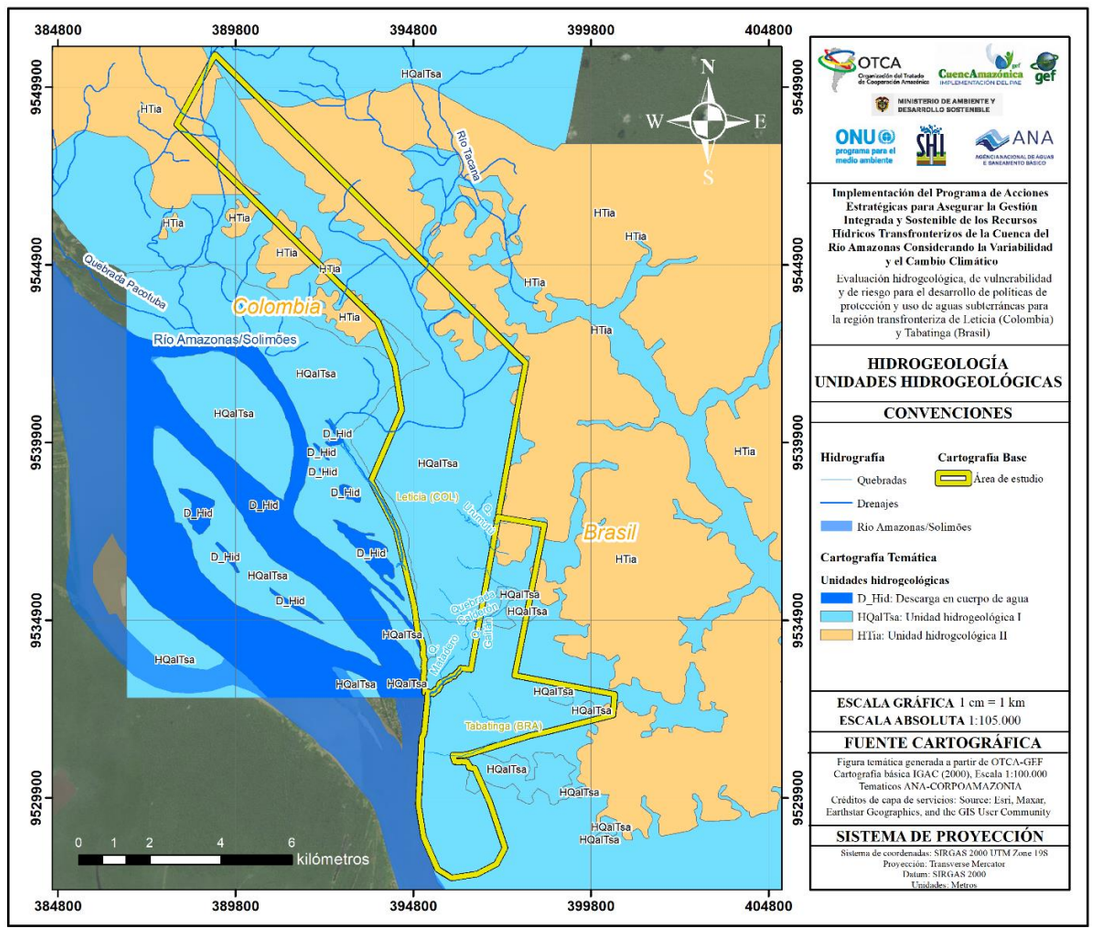


Figura 8. *Distribución espacial de las unidades hidrogeológicas. Generado a partir García-Romo (2008) y ANA (2015c). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

4.3. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos

La vulnerabilidad natural o intrínseca a la contaminación de un acuífero se refiere en términos generales a "características propias de un acuífero que determinan su sensibilidad a ser afectado por contaminación derivada de actividades antrópicas o procesos naturales" (MAVDT, 2010), y depende principalmente de las características geológicas, hidrogeológicas y topográficas del área, independiente de la naturaleza de los contaminantes y del escenario de contaminación (Zwahlen, 2003).

Los estudios regionales preliminares han determinado que las aguas subterráneas son utilizadas por todos los países en la región de la Amazonía; sin embargo, el acuífero presenta una elevada vulnerabilidad natural y un elevado potencial de contaminación, debido a que el nivel freático se encuentra cercano a la superficie (UNESCO & OEA, 2007).

En la zona de Leticia y Tabatinga la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos se ha calculado mediante los métodos GOD, que se basa en el modo de ocurrencia del agua subterránea, la litología y la profundidad del nivel freático, y DRASTIC, el cual emplea como parámetros el espesor de la zona no saturada, la recarga neta, la litología del acuífero, el tipo de suelo, la pendiente, la naturaleza de la zona no saturada y la conductividad hidráulica.

En Leticia, mediante el método GOD, se ha determinado que la vulnerabilidad del sistema acuífero, en términos generales, es moderada; esto se asocia que es un acuífero libre donde los niveles freáticos se encuentran cercanos a la superficie, lo que aumenta su vulnerabilidad; sin embargo, el suelo presenta alto contenido de limos y arcillas, lo que permite una disminución de la velocidad de infiltración de los contaminantes y un aumento en la capacidad de retención y reacción química del suelo, características favorables en términos de vulnerabilidad (OTCA & SHI SAS, 2015).

En Tabatinga se han empleado tanto los métodos GOD como DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero aluvial. En ambos casos se observa un resultado similar a lo obtenido para el municipio de Leticia, donde la vulnerabilidad general es moderada, asociada a la presencia de materiales limosos y arcillosos en las capas superiores (ANA, 2015c).

Ambos modelos elaborados de manera paralela coinciden de buena manera en términos de distribución espacial asociada a magnitudes de moderadas a baja, tal como se presenta en la Figura 9.

A pesar de que la vulnerabilidad del acuífero es moderada, se considera el riesgo de contaminación es alto, debido a la presencia de pozos poco profundos construidos sin la protección sanitaria adecuada. Además, el área de estudio se encuentra en una región altamente urbanizada, sin una adecuada implementación del plan de ordenamiento territorial en ambas ciudades, lo que resulta en una falta de saneamiento básico en la región: redes de recolección de efluentes domésticos e industriales, estaciones de tratamiento de aguas residuales, sistema de recolección y tratamiento de residuos sólidos, factores que contribuyen al aumento de la carga contaminante (ANA, 2015c).

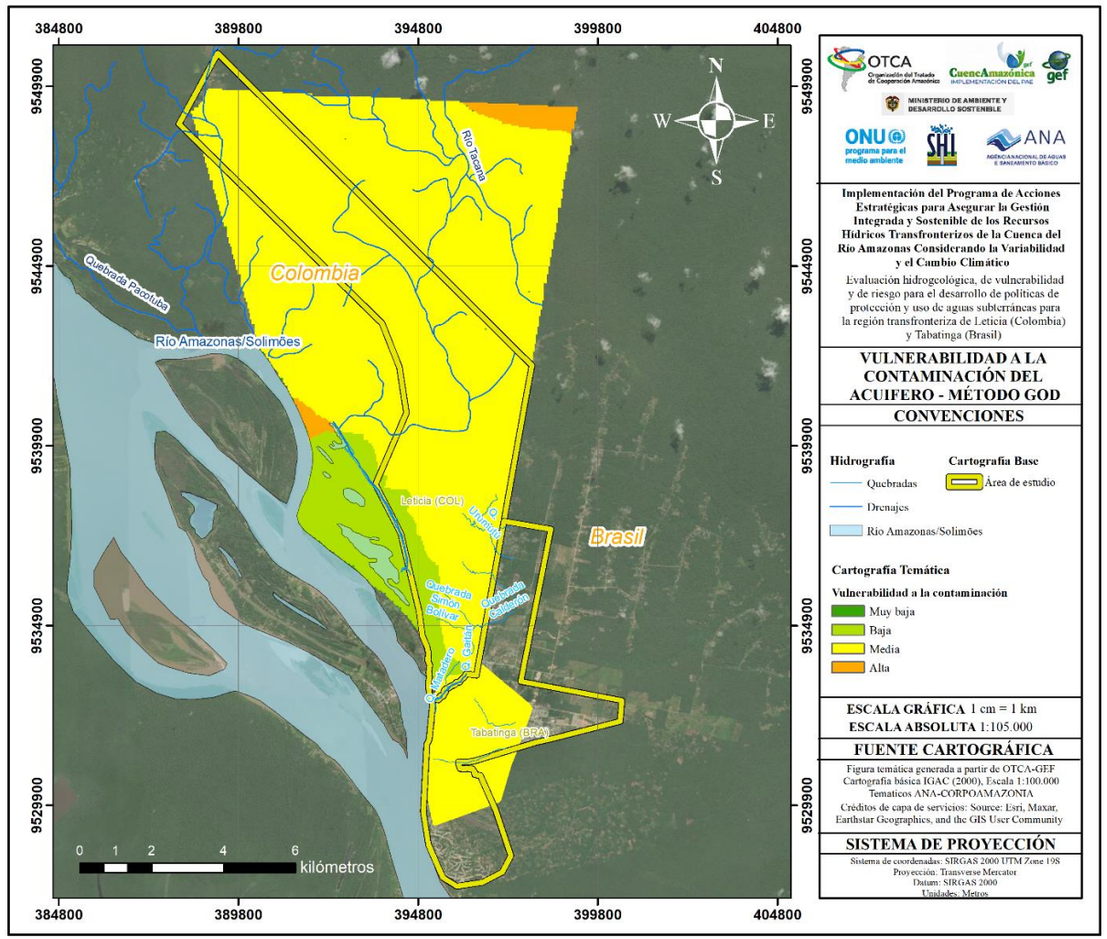


Figura 9. *Distribución espacial de los modelos de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero GOD. Tomado y adaptado de ANA (2015c) y OTCA&SHI SAS(2015). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

4.4. Calidad del agua subterránea

En términos generales, el agua subterránea del acuífero aluvial en la región de Leticia se encuentra en buenas condiciones de calidad de agua para consumo humano, exceptuando algunas zonas puntuales (OTCA & SHI SAS, 2015). Mediante el análisis de variables fisicoquímicas y bacteriológica, se determinó el agua subterránea en Leticia cumple con la mayoría de los criterios establecidos en la normatividad ambiental colombiana para consumo humano y/o uso doméstico, agrícola y pecuario expuestos en el Decreto 1076 de 2015 (Republica de Colombia, 2015). Sin embargo, en lugares específicos se encontró presencia de coliformes fecales, coliformes totales, E. coli y niveles bajos de pH. Adicionalmente, los resultados obtenidos indican la ausencia de contaminación por macronutrientes, materia orgánica (DBO y DQO), cloruros, grasas y aceites, lo que indica la ausencia de contaminación por actividades antrópicas.

Según estudios realizados en la ciudad de Tabatinga, los resultados de los parámetros biológicos en las aguas del Acuífero Aluvial indicaron la presencia tanto de coliformes totales como de E. coli. Este estudio de la ANA (2015c) sugiere que estos parámetros indicativos de contaminación de las aguas subterráneas pueden estar presentes probablemente debido al vertido de aguas residuales sin tratar, que se infiltran en el suelo debido a la baja cobertura de la red de alcantarillado en la región, y también a que la mayoría de los pozos son poco profundos y se construyen con técnicas inadecuadas. En cuanto al pH *in situ*, los resultados muestran que el agua subterránea del acuífero aluvial, en Tabatinga, se caracteriza por ser ácida, pero con una ligera tendencia a aumentar la acidez en la época seca. En general, las aguas tienen una muy baja o nula cantidad de metales pesados y se ha encontrado que los niveles de sólidos disueltos totales son muy bajos, por lo que las aguas son aptas para el consumo de los animales (ANA, 2015c).

4.5. Línea Base - Registro De Puntos De Agua Subterránea.

El registro de puntos de agua subterránea disponible para la zona de estudio proviene del estudio "Capítulo especial - caracterización hidrogeológica conjunta del sistema acuífero transfronterizo Tabatinga – Leticia" elaborado para el Proyecto GEF Amazonas por SHI S.A.S en 2015, como un análisis paralelo de los resultados obtenidos en los dos estudios hidrogeológicos efectuados en la zona de interés, realizando comparaciones principalmente de orden cualitativo, llegando a establecer características hidrogeológicas homologables del acuífero transfronterizo.

En total, la bibliografía resume 5 fuentes de información secundaria que aportan a la línea base de puntos de agua por actualizarse durante el desarrollo del presente contrato.

La información en Leticia (Colombia) es consolidada a partir del modelo hidrogeológico conceptual del área urbana, suburbana y de expansión urbana del municipio de Leticia departamento del Amazonas (García-Romo, 2008) en donde se registraron 1055 puntos de agua subterránea (1053 pozos de pequeño diámetro y poca profundidad y 2 aljibes).

Además, en la Evaluación de los Sistemas Acuíferos de la Región de Leticia – Colombia, desarrollado por la OTCA a través de la firma consultora SHI S.A.S en el año 2015, se realiza

la verificación y actualización de la información asociada a 224 de los pozos, los cuales hacen parte de los puntos registrados por García-Romo (2008).

Adicional a esta información, se cuenta con el registro de los expedientes de CORPOAMAZONIA (Colombia), con las concesiones otorgadas posteriores al año 2015 y que configuran la base de datos de puntos de agua a ser inventarios y complementados en campo durante el año 2022, en el marco del presente estudio.

Por su parte, en Tabatinga (Brasil) se cuenta con un registro de 121 puntos de agua subterránea, que corresponden en su totalidad a pozos de pequeño diámetro y poca profundidad (pozos tubulares rasos); de los 121 pozos en Tabatinga, 68 son catalogados en el SIAGAS del Servicio Geológico de Brasil (CPRM, 2010) y los 53 pozos restantes corresponden al registro elaborado por la ANA en el 2015 en el marco del proyecto "*Provincia Hidrogeológica del Amazonas*" (ANA, 2015c); la información consolidada para los 121 pozos se obtiene del "*Volumem IX Cidade Piloto: Tabatinga – AM*" (ANA, 2015c). Los puntos de agua a ser inventariados en el marco de este estudio se encuentran por fuera de esta base de datos suministrada por ANA (Brasil).

En la Tabla 3 se observa el total de puntos de agua que se tienen registrados sobre el acuífero aluvial transfronterizo Leticia – Tabatinga, que suman 1205 entre ambos países, los cuales están debidamente georreferenciados y cuentan con información básica de sus características físicas, información que se puede encontrar en el **Anexo_08_InformacionBase**. Las fuentes de información que contienen las bases de datos de los puntos de agua subterránea se resumen en la Tabla 3 y su distribución espacial que se presenta en Figura 10.

Tabla 3. *Puntos de agua subterránea registrados según su fuente en la zona de estudio. (ANA, 2015c – OTCA&SHI, 2015 & García-Romo, 2008)*

Municipio	Fuente (Línea Base)	Pozos	Aljibes
Leticia	Registro realizado por García-Romo, 2008	1053	2
	Registro realizado por OTCA& SHI SAS, 2015*	224	0
	Expedientes CORPOAMAZONIA a 2022**	31	0
Tabatinga	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010)	53	0
	Agencia Nacional de Aguas ANA – Proyecto PHA, 2015	68	0
	TOTAL	**1205**	**2**

*Estos pozos están incluidos en el registro de García-Romo (2008), por eso no suman al total.
**Información nueva verificada en campo e incluir en las bases de datos de puntos de agua del presente estudio.

Es importante aclarar que los estudios hidrogeológicos anteriores utilizados como referencia para la base de datos de este inventario presentan diferencias en la resolución temporal y espacial (diferentes escalas de trabajo y diferentes períodos de monitoreo y ejecución de pruebas), así como en las metodologías de exploración y caracterización hidrogeológica (OTCA y SHI SAS, 2015). Esto constituye un factor limitante para realizar comparaciones basadas en esta información sin llevar a cabo estudios más profundos y a largo plazo.

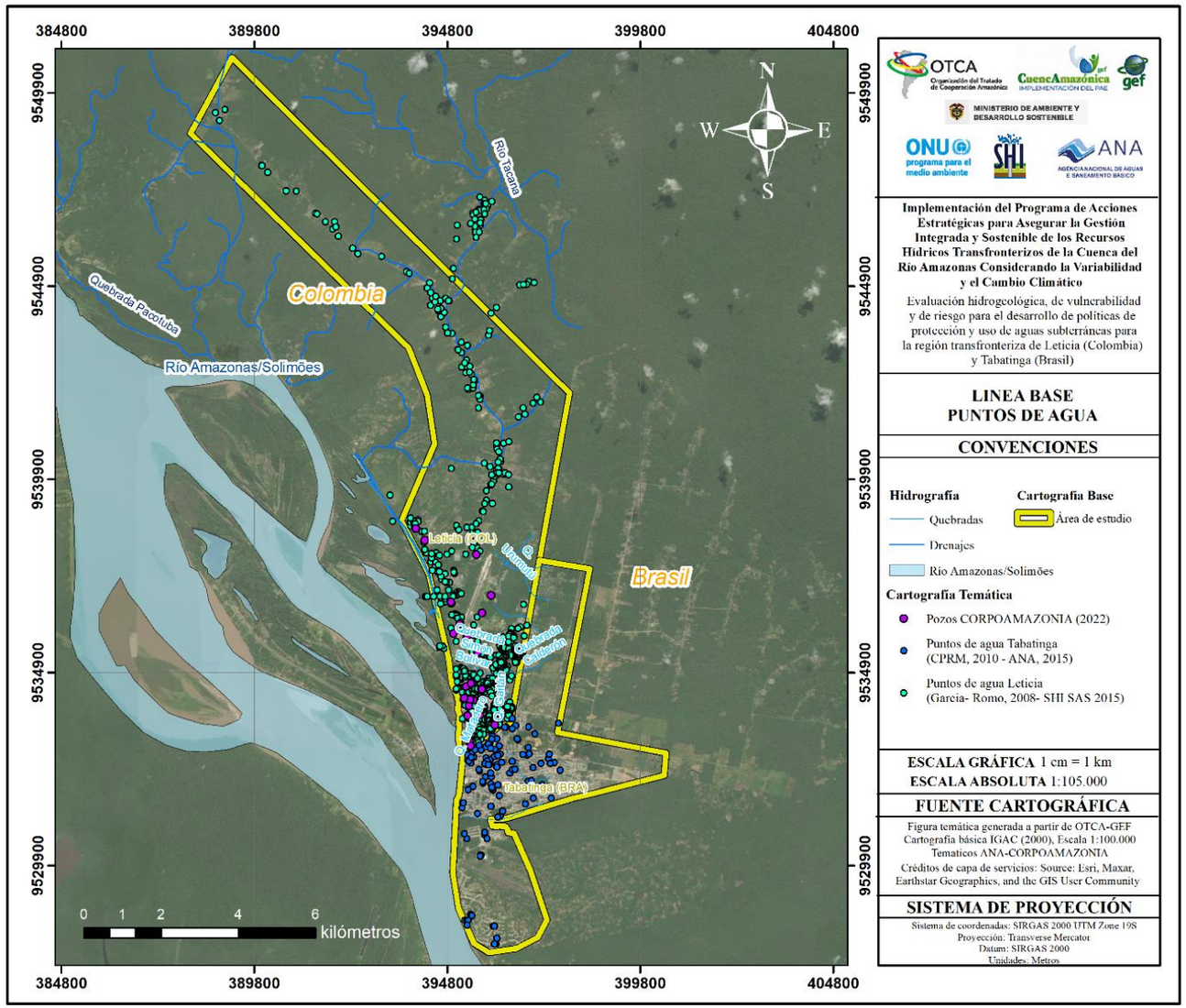


Figura 10. *Distribución espacial de los puntos de agua. Línea base a partir de García-Romo (2008), ANA (2015c) y OTCA& SHI SAS (2015). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

Para Leticia, se estima que el número real de puntos de agua subterránea en el área urbana, suburbana y suelo de expansión es muy cercano al total mencionado en ambas referencias (García-Romo, 2008; OTCA & SHI SAS, 2015); sin embargo, es probable que este número sea levemente mayor, teniendo en cuenta los pozos que se construyen informalmente y no tienen concesión registrada por CORPOAMAZONIA a partir de 2015 (fecha en que se hizo el último estudio de inventario de puntos de agua en la zona).

Para el caso de Tabatinga, ANA (2015c) y Azevedo et al (2005), coinciden en que la ciudad puede existir más de 2000 pozos de agua subterránea, conclusión a la que llegan por información verbal suministrada por los habitantes de Tabatinga en el año 2012 (ANA, 2015c) y a partir de proyecciones realizadas por el Sistema de Información de Atención Básica- SIAB (Azevedo et al, 2005 en OTCA&SHI, 2015).

Como se mencionó en el registro, tanto en Leticia como en Tabatinga el tipo de captaciones de agua subterránea predominante son pozos perforados revestidos principalmente en PVC, con un diámetro que oscila entre 4 y 8 pulgadas (OTCA & SHI SAS, 2015). La gran mayoría de los puntos registrados de la región fronteriza tienen profundidades menores a 30 m y la profundidad típica corresponde a 18 m (OTCA & SHI SAS, 2015). Además, la mayoría de los pozos, tanto en Leticia como en Tabatinga, son construidos por perforación con rotación manual, mediante empresas perforadoras que operan en ambas regiones bajo la misma metodología (OTCA & SHI SAS, 2015).

De los puntos de agua registrados en la zona de estudio (1055 para leticia y 121 para Tabatinga), los pozos productivos representan el 93,8% en Leticia y el 89% Tabatinga; además, los pozos inactivos o abandonados corresponden al 5,3% y 9% en Leticia y Tabatinga respectivamente, como se puede apreciar en la Figura 11.

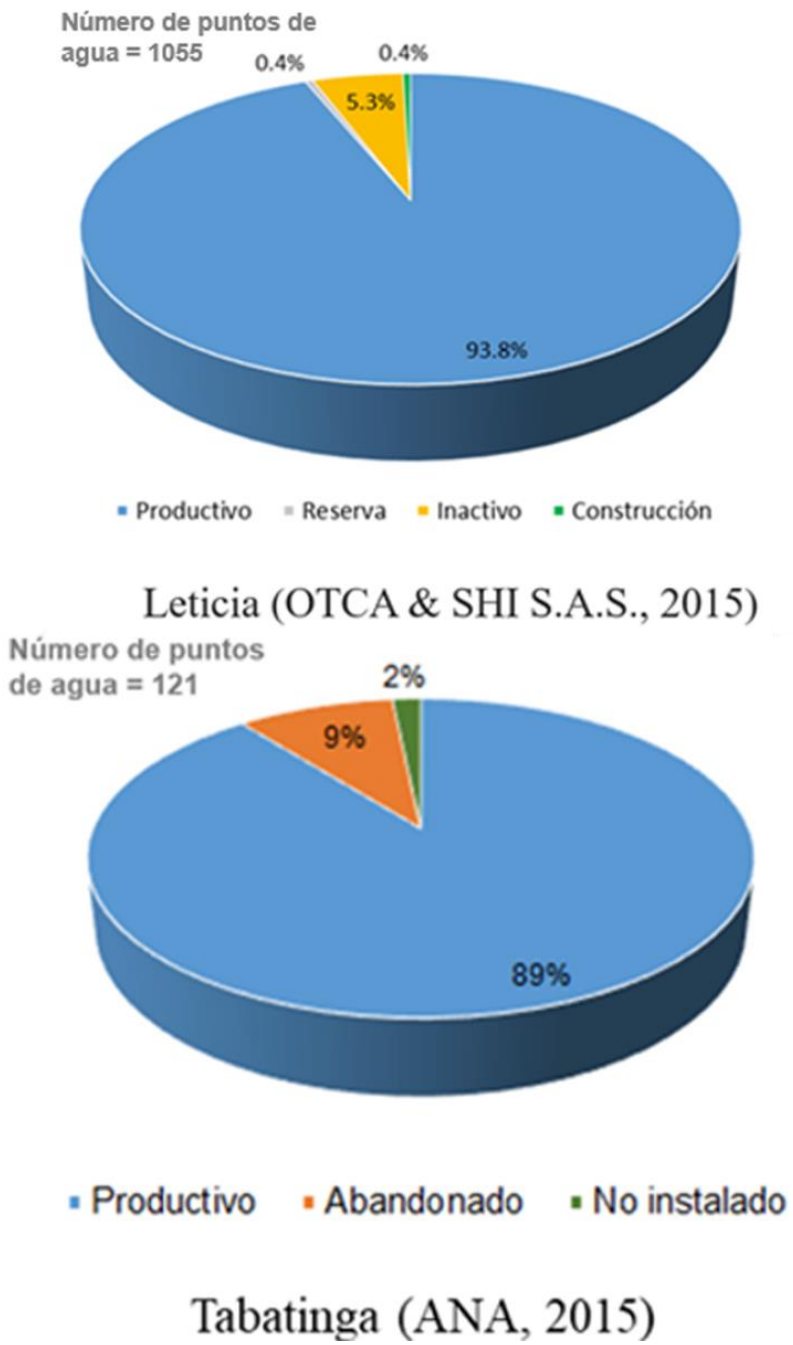


Figura 11. *Estado de los puntos de agua subterránea del acuífero aluvial transfronterizo Leticia – Tabatinga. Adaptado de (OTCA & SHI SAS, 2015) y ANA, (2015c).*

Como puede inferirse por la densidad de pozos sobre la zona urbana en ambas regiones, el uso del agua subterránea que se capta del acuífero aluvial transfronterizo Leticia – Tabatinga, es principalmente con fines domésticos, dado en Leticia en una participación del 88,1 %, donde el 87,2% corresponde a uso doméstico para abastecimiento particular y el 0,9% para abastecimiento público; mientras que en Tabatinga representa un 76,9 %, clasificándose como consumo humano el uso de agua destinada a la ingestión, preparación y producción de alimentos y a la higiene personal, independientemente de su origen (OTCA & SHI SAS, 2015).

El uso industrial en las dos zonas es históricamente muy bajo hasta 2015, constituyendo un ítem de alto interés en la actualización del inventario. El uso "múltiple" en Tabatinga representa un porcentaje importante de participación, y puede corresponder con usos pecuario y recreativo identificados en menor medida en Leticia (OTCA & SHI SAS, 2015; ANA, 2015c). En la Figura 12 presenta la distribución de usos del agua subterránea en la región de Leticia y Tabatinga.

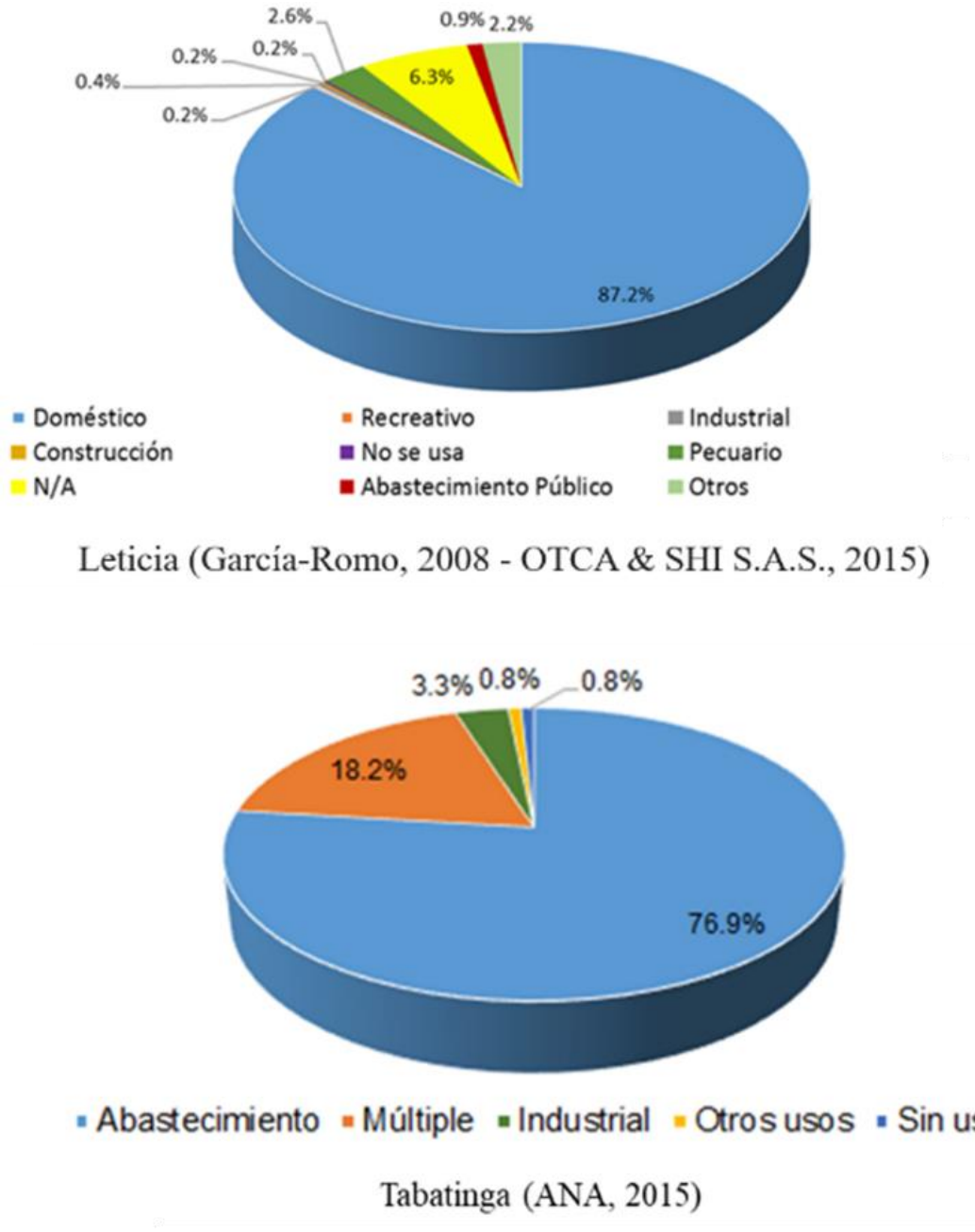


Figura 12. *Uso de agua en los puntos del acuífero aluvial transfronterizo Leticia – Tabatinga. Análisis a partir del registro de 1055 puntos de Leticia y 121 de Tabatinga. Modificado de (OTCA & SHI SAS, 2015) y ANA, (2015c).*

En el área urbana, el régimen de bombeo es comparable entre ambas ciudades, con un rango de variación entre 0 y 2,5 m^3/h en Tabatinga y en Leticia entre 0,03 y 1 m^3/h (OTCA & SHI SAS, 2015). La Figura 13 presenta la distribución de los datos de caudales en las dos zonas de interés.

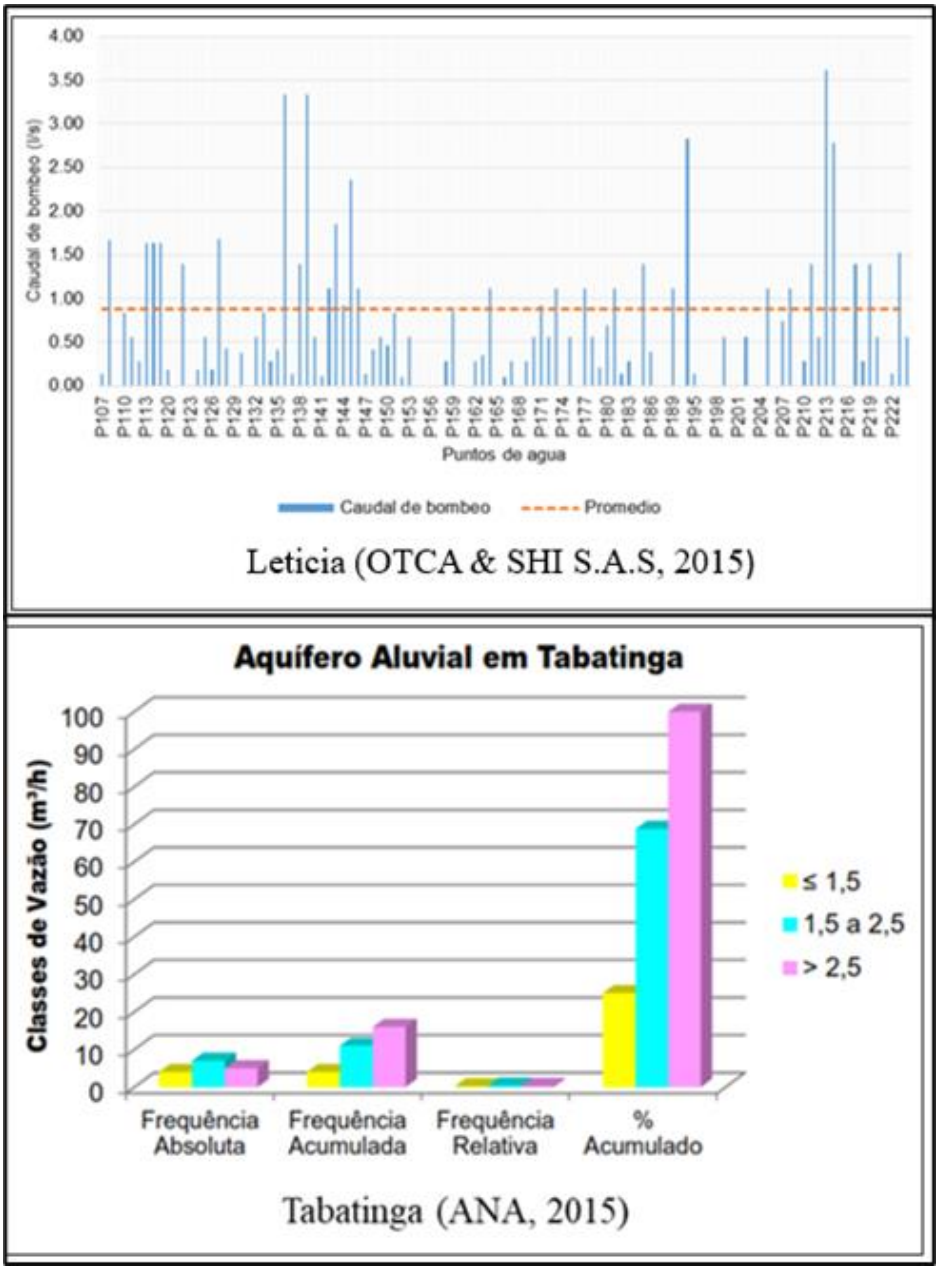


Figura 13. *Caudales de extracción de aguas subterráneas en pozos de las zonas urbanas de Tabatinga y Leticia. Modificado de (OTCA & SHI SAS, 2015) y ANA, (2015c).*

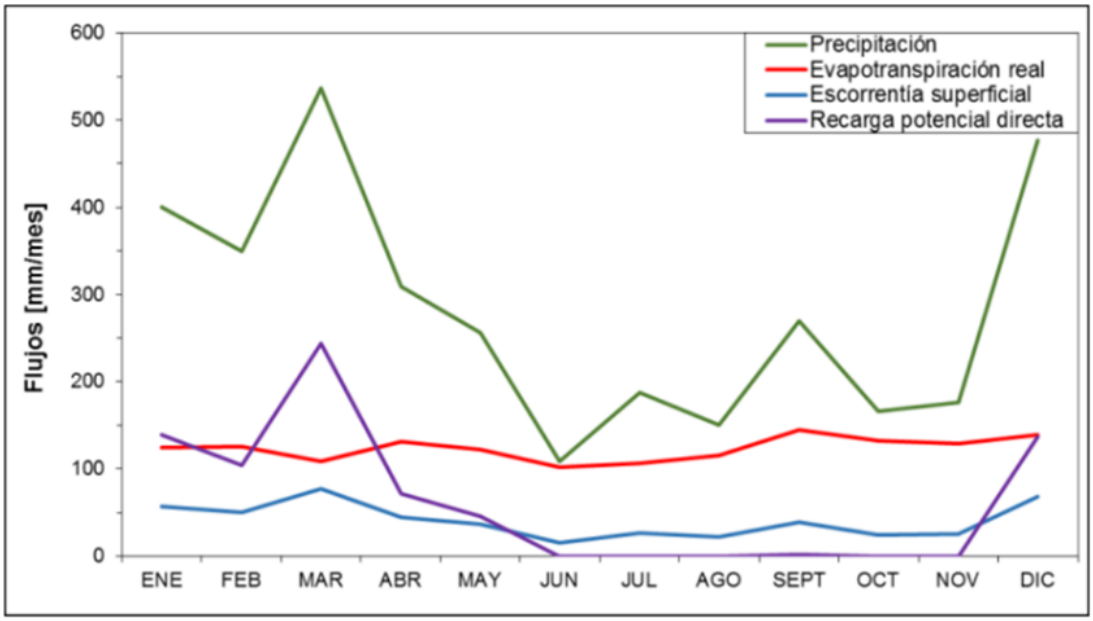
4.6. Piezometría y direcciones de flujo

Los niveles piezométricos del acuífero aluvial se han medido en diversas campañas de campo ejecutadas por diversos autores en el área de estudio. De manera general, se ha obtenido información de los niveles piezométricos del acuífero aluvial en un periodo húmedo, mientras que la misma información para un periodo de transición (transición entre régimen climático de seco a húmedo), se ha obtenido únicamente en Tabatinga (OTCA & SHI SAS, 2015). Es importante aclarar que la campaña de campo de la presente consultoría realiza el inventario en la zona de estudio para un periodo de transición de seco a húmedo.

Pese a que ambas ciudades difieren notablemente en tamaño y cantidad de pozos con registro de nivel del agua subterránea, la tendencia de la distribución de la profundidad de los niveles estáticos es muy similar, siendo típicamente niveles menores a 6 m, distribuyendo los niveles más profundos en cercanías al cauce del río Amazonas (entre 4 y 6 m aproximadamente), mientras que el norte de Leticia y el nororiente en Tabatinga presentan los niveles más superficiales que oscilan entre los 0.2 y los 4 metros aproximadamente (OTCA & SHI SAS, 2015).

El trazado de las líneas de flujo presenta dos rasgos hidromorfológicos principales marcados por la recarga y la descarga del acuífero transfronterizo, las cuales según García-Romo (2008) tienen una dirección principal noreste-suroeste, en dirección al río Amazonas y la ciudad de Leticia.

La variabilidad espacial de la recarga potencial por precipitación muestra que las zonas de mayor recarga coinciden con sectores donde el suelo presenta una textura predominantemente franco-arenosa, principalmente sobre la parte alta de la cuenca de la quebrada Yahuarcaca y la parte baja de las cuencas Pichuna y Tacana (Vélez & Bastidas, 2018). La recarga potencial directa, responde de manera lineal a las variaciones de precipitación, siendo de mayor magnitud en el periodo húmedo y de menor magnitud en condiciones secas (Vélez & Bastidas, 2018), oscilando entre 23 y 30% de la precipitación (Figura 14) y añadiéndose a dicho análisis el control asociado al flujo base del río Amazonas.



Condición hidrológica	Precipitación P [mm/año]	Recarga Rp [mm/año]	Rp/P [%P]
Normal	3388	905	27%
Seco	2859	655	23%
Húmedo	3870	1284	33%

Figura 14. *Ciclo anual del balance hídrico en una zona homogénea del área de estudio para un periodo normal de lluvias y resumen de la recarga potencial directa promedio para diferentes condiciones hidrológicas. Adaptado de (Vélez & Bastidas, 2018).*

La zona de descarga del sistema acuífero transfronterizo se da hacia el sur principalmente, marcada por las curvas de isopiezas semicerradas que se presentan en la ciudad de Leticia, con la convergencia de las aguas subterráneas hacia los pozos registrados en diferentes campañas y el control del río Amazonas, que García-Romo (2008) plantea como una retroalimentación asociada una zona con mayor aprovechamiento del recurso.

Las condiciones antrópicas definen gran parte del comportamiento piezométrico, pues en zonas donde se reporta la mayor cantidad de obras de captación de agua subterránea se producen procesos de descarga por bombeo. Naturalmente, las aguas fluyen en sentido noreste-suroeste buscando el río Amazonas (zona de descarga natural), y se infiere que el acuífero aporta al nivel base del río, y localmente algunas líneas de flujo presentan un movimiento hacia el noroeste-sureste, aportando una descarga en la quebrada Yahuarcacá (García-Romo, 2008; Vélez & Bastidas, 2018; OTCA & SHI SAS, 2015).

Este contexto es inferido por el comportamiento de los más de 1000 pozos registrados a lo largo del tiempo en la zona, indica la relación directa que guarda el acuífero aluvial con el río Amazonas, descargando los excesos de agua del suelo en el cauce (OTCA & SHI SAS, 2015); sin embargo, es importante mencionar que estas direcciones de flujo corresponden al perfil superficial del acuífero y que por debajo de este, se encuentra un espesor saturado de importante magnitud, que es mantenido por los aportes del flujo base del río Amazonas hacía sus sedimentos laterales (Vélez & Bastidas, 2018).

5. PRIMER TALLER REGIONAL

En el marco del constante relacionamiento con las Unidades Nacionales de Coordinación del Proyecto -UNCP, Agencia Nacional del Agua y Saneamiento - ANA de Brasil y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente de Colombia, para la ejecución efectiva de las actividades celebradas en el presente contrato, fueron identificados los diferentes actores involucrados e interesados en la intervención, con el fin de obtener información técnica de primera mano necesaria para la correcta ejecución de los trabajos de campo con el apoyo de las entidades pertinentes.

Los actores identificados inicialmente fueron los siguientes:

1. Secretaría De Competitividad, Medio Ambiente y Turismo de Leticia
2. Alcaldía de Tabatinga
3. Gobernación del Amazonas (Colombia)
4. Alcaldía de Leticia
5. Asociaciones de usuarios del recurso hídrico de Leticia y Tabatinga
6. Representantes de Sectores Económicos Leticia y Tabatinga
7. Representantes de las comunidades étnicas Leticia y Tabatinga
8. Sector Académico Leticia y Tabatinga
9. Viceconsulado de Brasil en Leticia
10. Representantes sociales de los municipios de Leticia y Tabatinga
11. Consulado de Colombia en Tabatinga
12. Ministerio Público Federal en Tabatinga
13. Fiscalía de Tabatinga
14. Subsección Judicial de Tabatinga - Tribunal Regional Federal de la 1ra Región
15. Comisaría de la Policía Federal en Tabatinga
16. Unión Casa Militar Presidencia de la República en Tabatinga
17. Comando del Ejército en Tabatinga
18. Comando de la Fuerza Aérea en Tabatinga
19. Marina de Brasil en Tabatinga (Capitanía de Río de Tabatinga)
20. Superintendencia de la Zona Franca de Manaos en Tabatinga
21. Fundación Nacional del Indio en Tabatinga
22. Empresa de Saneamiento de Amazonas en Tabatinga
23. Fiscalía General de la nación, Seccional Leticia
24. Cancillería Colombiana.
25. Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia-CORPOAMAZONIA (Colombia)
26. Servicio Geológico de Brasil-CPRM
27. Capitanía del Puerto de Leticia - Unidad regional de la Dirección General Marítima-DIMAR (Colombia)
28. EMPUAMAZONAS S.A – Leticia
29. Departamento de Policía del Amazonas - ESPRI Comando Amazonas (Leticia)-ESPRI Amazonas
30. Grupo Aéreo del Amazonas -Fuerza Aérea Colombiana - Leticia-GAAMA

31. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM (Colombia)
32. Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC (Colombia)
33. Instituto de Protección Ambiental do Amazonas-IPAAM (Brasil)
34. Organización del Tratado de Cooperación Amazónica-OTCA
35. Secretaria de Estado de Medio Ambiente do Amazonas-SEMA (Brasil)
36. Servicio Geológico Colombiano-SGC (Colombia)
37. Superintendencia de industria y Comercio de Colombia - SIC Móvil Amazonas
38. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas-SINCHI (Colombia)
39. Vigésima Sexta Brigada del Ejército Nacional de Colombia - Leticia (Amazonas)
40. Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios de Leticia – USPDL.
41. Secretaria de Estado e Infraestructura de la región Metropolitana de Manaus – SEINFRA (Brasil)
42. Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología del Amazonas, Campus Tabatinga
43. Centro de Estudios Superiores de Tabatinga, Universidad Estadual del Amazonas
44.

Estos actores fueron parte fundamental para el cumplimiento de los siguientes objetivos de los talleres regionales realizados:

- Informar a los actores acerca del proyecto, sus alcances, actividades, tiempos de ejecución, así como de los avances y resultados.
- Actualizar de forma participativa, la base de actores relevantes para un real enfoque participativo del contrato y el suministro de nueva información.
- Propiciar espacios donde los actores realizaran aportes en las diferentes fases de contrato como, por ejemplo, en la definición de las directrices para el uso sostenible y la protección de las fuentes de agua subterránea a nivel local.
- Construir de forma participativa los escenarios futuros deseables teniendo en cuenta las condiciones del sistema hídrico, las amenazas a las que está sometido y las condiciones socioeconómicas de la población cercana a éste.
- Definir una estrategia de comunicación que posibilitara la difusión permanente de los avances del estudio, donde se favoreciera la promoción, divulgación y efectividad de los mensajes en los diferentes actores relacionados con el agua subterránea.

El primer taller regional se llevó a cabo el día 13 de septiembre del 2022, en el hotel Anaconda de la ciudad de Leticia, Colombia, y estuvo a cargo de la empresa Servicios Hidrogeológicos Integrales SAS. Presencialmente asistieron 19 personas de las entidades de CORPOAMAZONIA, MinAmbiente, Cámara de comercio del Amazonas, Cancillería de Colombia, Gobernación del Amazonas, OTCA, SINCHI e IPAAM Brasil (Foto 1) y virtualmente se conectaron 5 personas de MinAmbiente, OTCA y ANA Brasil (Figura 15). (La lista de asistencia se encuentra en el **Anexo_02_PrimerTallerRegional**)

El contenido del primer taller se presenta fiel al del informe inicial, donde se contextualizan los alcances, el plan de trabajo del contrato y los avances técnicos en relación con los antecedentes del proyecto, la búsqueda de información secundaria y las limitantes clave para el correcto desarrollo de las actividades de campo, que iniciaron 24 horas después de la realización del taller. La reunión de coordinación siguió la agenda presentada en la Tabla 4.

Tabla 4. *Agenda del primer taller regional. Encuentro presencial en la ciudad de Leticia con transmisión virtual vía Microsoft Teams. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Hora	Acto	Duración
08:30 a. m.	Apertura del taller regional (MinAmbiente)	20 min
8:50 a. m	Presentación de entidades asistentes (MinAmbiente)	20 min
9:10 a. m	Contexto Proyecto Implementación del Programa de Acciones Estratégicas PAE- Cuenca Amazónica (UNCP –SP/OTCA)	20 min
09:30 a. m.	Objetivo, alcance, metodología del proyecto binacional en región transfronteriza de Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil) (SHI)	1 hora
10:15 a. m.	Intervenciones, preguntas	15 min
10: 30 a. m.	Receso (Refrigerio)	15 min
10:30 a. m.	Cierre del evento	15 min



Foto 1. *Registro multimedia de la primera reunión de coordinación con actores regionales. Reunión presencial. Hotel Anaconda-Leticia-Colombia. 13/09/2022. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*



Figura 15. *Captura de pantalla a la asistencia virtual. Reunión de Microsoft Teams. 13/09/2022. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

De manera general, el taller regional no obtuvo la participación de todas las entidades identificadas e invitadas, debido a que los invitados oficiales no tuvieron tiempo suficiente para tramitar en las agencias gubernamentales brasileñas para que todos los representantes pudieran ser autorizados a viajar al país vecino. Sin embargo, posteriormente se realizó una reunión virtual con algunos de estos actores, cuya participación se considera fundamental en el proceso. De esta forma, se logró el objetivo del primer taller, donde se entabló relación con las entidades institucionales y se derivaron diferentes encuentros relacionados con los compromisos adquiridos durante el encuentro (**Anexo_02_PrimerTallerRegional**).

Cabe destacar que dentro de los compromisos más importantes con los actores institucionales se derivaron:

(1) Hacer una reunión entre la cancillería, IGAC, MinAmbiente y la empresa consultora para definir la cartografía base de Colombia a ser empleada en el estudio.

(2) Suministrar la información referente a los TdR a los interesados en este taller.

(3) Compartir la presentación del primer taller regional a los asistentes, espacialmente a quienes requieren ayudas o memorias para la gestión de la información.

(4) Un contacto con la alcaldía de Tabatinga y el consulado para socializar los nombres de las personas que se encargaron de las actividades de campo en esta zona.

(5) Se deja como recomendación la necesidad de invitar con un mes de anticipación a las entidades, con un contacto directo por parte de la consultoría en compañía con las UNCP´s tanto de Brasil como de Colombia.

6. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

El presente documento se construye con base en la descripción metodológica y los hallazgos de campo, trabajo ejecutado desde septiembre 14 hasta el 23 de noviembre de 2022.

La metodología general para la actualización de los puntos de agua subterránea en el área de estudio, se fundamenta en la identificación y caracterización de las captaciones subterráneas concesionadas por las entidades competentes en cada país posteriores a 2015 y también las no concesionadas, para complementar las características de las unidades geológicas con fines hidrogeológicos, tales como: tipo de roca, porosidad primaria, identificación de los principales procesos de meteorización y fracturamiento, entre otros. De esta forma, para la actualización del inventario de puntos de agua, se parte de los pozos ya inventariados (121 en Tabatinga / 226 en Leticia), y se busca ampliar la información del sistema acuífero transfronterizo en un mínimo de 54 puntos (25 con la base de datos suministrada por la ANA en Brasil y 29 pozos con concesión otorgada por CORPOAMAZONIA en Colombia).

Esta información se obtiene por medio de encuestas puerta a puerta, donde en Colombia se diligencia el Formato Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua Subterránea (FUNIAS), diseñado por el IDEAM, INGEOMINAS y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente, y para el inventario en Brasil se emplea el formato suministrado por la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico -ANA (Cadastro de Fontes de Abastecimento por Águas Subterrâneas). En ambos formatos se consigna la información de las características físicas del punto de agua, parámetros fisicoquímicos de campo, nivel del agua subterránea (nivel piezométrico) estático (donde aplique, se midió por medio de una sonda de nivel), características de explotación, usos y usuarios y condiciones sanitarias de la captación y su entorno.

La principal limitante de esta actividad fue la dificultad en el acceso a los predios donde están los pozos que pertenecen a personas naturales y jurídicas ya que, en el primer caso las personas se rehúsan a permitir el acceso a su captación porque temen algún tipo de comparendo ambiental o simplemente refieren que no están obligados a dejar entrar al personal técnico de la firma consultora. Por otro lado, otro inconveniente es la forma constructiva de las captaciones que en ocasiones imposibilita el ingreso de la sonda de nivel para medición del nivel de agua subterránea. Así mismo, las personas que atienden y acompañan la visita en general, no tienen conocimiento acerca de las especificaciones técnicas del pozo (sello sanitario, profundidad, sistema de bombeo, diseño del pozo, entre otros).

Al tratarse de un recurso subterráneo, el inventario de puntos de agua corresponde a la única fuente de información directa del funcionamiento, condiciones y extensión del sistema acuífero Leticia-Tabatinga. Bajo esta premisa, la actividad busca actualizar y ampliar la información sobre los usuarios y usos del agua subterránea, actualizar el diagnóstico sanitario de las captaciones de agua y la cercanía con actividades que potencialmente puedan generar contaminación *in situ*; la actualización del mapa de niveles freáticos existente y confirmación de las direcciones de flujo del agua subterránea a partir de los nuevos puntos y la actualización de mapas de parámetros fisicoquímicos de campo (pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica).

Adicionalmente, estas actividades aportan en la estimación de la demanda de agua subterránea, el diseño e implementación del inventario de fuentes potenciales de contaminación, la definición de los puntos para el monitoreo de niveles de agua subterránea y el muestreo de calidad de agua.

6.1. Actualización del inventario de puntos de agua subterránea

Para la actualización del inventario en el área de estudio se realizó una campaña de campo en donde se registraron un total de 68 puntos de los cuales 67 corresponden a pozos perforados y 1 a un aljibe excavado de forma artesanal, que se presentan resumidos en la Tabla 5 y distribuidos espacialmente como se muestra en la Figura 16.

Los resultados de los parámetros de esta campaña de campo se analizan en este capítulo, y posteriormente se volvieron a tomar los parámetros en algunos de los mismos puntos, pero en otra campaña correspondiente a la construcción de la red preliminar de monitoreo (capítulo 9).

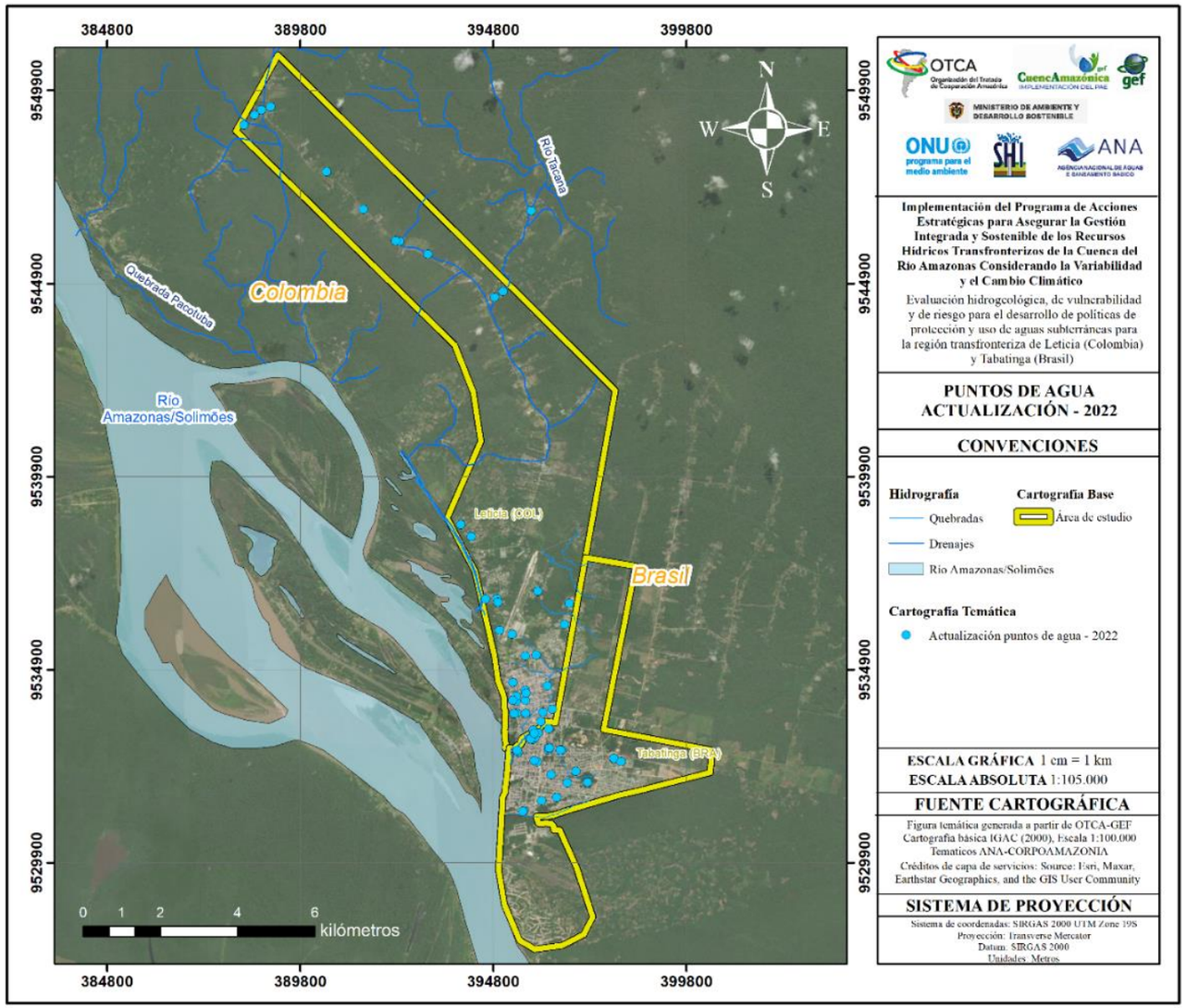


Figura 16. *Distribución espacial de los puntos de agua inventariados. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-20*

Tabla 5. *Resumen de la actualización del inventario de puntos de agua subterránea. Ubicación de los puntos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Consecutivo	Fecha	Tipo de punto	Municipio	Nombre del lugar	Coordenadas -UTM Zone 19S*		Altura (msnm)
					Este	Norte	
PZ-NM-01	14/09/2022	Pozo	Leticia	Finca Villa Francia	390.481,13	9.547.795,73	94,00
PZ-NM-02	14/09/2022	Pozo	Leticia	Finca San Sebastián	394.223,62	9.538.341,98	87,00
PZ-NM-03	14/09/2022	Pozo	Leticia	Finca La María	393.963,01	9.538.652,43	77,49
PZ-NM-04	15/09/2022	Pozo	Leticia	ICARO	395.287,30	9.535.806,73	42,00
PZ-NM-05	15/09/2022	Pozo	Leticia	SENA LAGOS	394.966,52	9.535.916,89	78,00
PZ-NM-06	16/09/2022	Pozo	Leticia	Centro comercial Canoa	395.400,38	9.534.074,90	71,00
PZ-NM-07	16/09/2022	Pozo	Leticia	SENA – Centro para la biodiversidad y el turismo	395.307,30	9.534.566,12	87,00
PZ-DM-01	17/09/2022	Pozo	Leticia	Barrio 11 de noviembre	396.201,51	9.534.475,07	74,00
PZ-NM-08	17/09/2022	Pozo	Leticia	Hotel Decameron	395.400,76	9.533.767,81	61,00
PZ-NM-09	17/09/2022	Pozo	Leticia	Estación de servicio El Porvenir	396.030,08	9.533.548,01	78,36
PZ-NM-11	20/09/2022	Pozo	Leticia	Estación experimental de primates – FIDIC	395.341,27	9.533.758,46	76,89
PZ-DM-02	21/09/2022	Aljibe	Leticia	Barrio Castañal	395.834,51	9.533.326,43	70,21
PZ-NM-12	21/09/2022	Pozo	Leticia	Banco de la Republica – Colombia	395.397,52	9.534.212,52	77,85
PZ-DM-03	22/09/2022	Pozo	Leticia	Gasolinera internacional de Terpel	396.088,87	9.533.790,75	78,05
PZ-NM-13	22/09/2022	Pozo	Leticia	Amazornamental – Finca Montebello	395.786,08	9.546.788,71	60,00
PZ-NM-14	22/09/2022	Pozo	Leticia	Numae	395.640,24	9.533.767,01	77,62
PZ-NM-15	24/09/2022	Pozo	Leticia	Centro recreacional Cafamaz	394.892,01	9.536.734,00	78,96
PZ-NM-16	24/09/2022	Pozo	Leticia	Centro recreacional Cafamaz	394.920,08	9.536.641,56	78,78
PZ-NM-17	26/09/2022	Pozo	Leticia	Armada Nacional – Comando guardacostas del Amazonas	395.951,91	9.536.931,46	0,00
PZ-NM-18	26/09/2022	Pozo	Leticia	Gaseosas Leticia SAS	395.631,60	9.534.090,53	100,00
PZ-NM-19	27/09/2022	Pozo	Leticia	Banco de la República – Colombia	395.308,19	9.534.104,59	78,43
PZ-NM-20	28/09/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Tenente Fernandes	396.050,94	9.531.496,16	98,00
PZ-DM-05	29/09/2022	Pozo	Leticia	Colegio kilómetro 19	389.032,20	9.549.482,93	82,72
PZ-DM-06	29/09/2022	Pozo	Leticia	Hotel restaurante Karupa	391.438,21	9.546.844,92	80,66
PZ-NM-21	29/09/2022	Pozo	Leticia	Comunidad del km 18	388.790,93	9.549.402,93	83,89
PZ-NM-22	29/09/2022	Pozo	Leticia	Estadero Puerta del sol	392.365,92	9.545.992,69	79,17
PZ-NM-23	29/09/2022	Pozo	Leticia	Kilómetro 12 vía Leticia-Tarapacá	392.268,57	9.546.012,93	78,88
PZ-DM-07	30/09/2022	Pozo	Leticia	Colegio Francisco Rosario Vela sede B	396.643,61	9.536.065,55	77,70
PZ-DM-08	30/09/2022	Pozo	Leticia	Colegio Francisco Rosário Vela – sede A	395.909,50	9.535.279,29	77,76
PZ-NM-24	30/09/2022	Pozo	Leticia	Km 2 barrio Los Escobados sector 1 Casa #4	394.600,65	9.536.729,70	78,04
PZ-NM-25	30/09/2022	Pozo	Leticia	Escuela Normal Superior Sede “A”	395.622,02	9.534.365,05	78,24
PZ-NM-26	30/09/2022	Pozo	Leticia	Colegio Gaitán sede sagrado Corazón de Jesús	396.327,08	9.533.869,37	77,93

Consecutivo	Fecha	Tipo de punto	Municipio	Nombre del lugar	Coordenadas -UTM Zone 19S*		Altura (msnm)
					Este	Norte	
PZ-NM-27	30/09/2022	Pozo	Leticia	Barrio manguare segunda fase	396.773,65	9.536.610,61	78,30
PZ-NM-28	30/09/2022	Pozo	Leticia	Carrera 7 con calle 16	395.630,20	9.535.247,85	78,26
PZ-NM-29	1/10/2022	Pozo	Leticia	Carrera 8 con calle 10	395.646,77	9.534.290,15	70,00
PZ-NM-30	3/10/2022	Pozo	Leticia	Hebrón ONG	393.104,64	9.545.667,00	81,00
PZ-NM-31	3/10/2022	Pozo	Leticia	Comunidad km 11	394.834,10	9.544.542,67	80,67
PZ-NM-32	3/10/2022	Pozo	Leticia	Comunidad km 12	395.056,34	9.544.690,64	80,01
PZ-NM-33	3/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Ana Nery, 84. Bairro São Francisco	395.820,96	9.533.076,92	77,61
PZ-NM-34	3/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua São Raimundo / Rua Marechal Rondon	395.801,95	9.533.158,59	78,50
PZ-NM-35	3/10/2022	Pozo	Tabatinga	Bairro São Francisco, rua São Raimundo, casa 48	395.851,12	9.533.146,21	78,55
PZ-NM-36	3/10/2022	Pozo	Tabatinga	Bairro São Francisco rua São Raimundo, casa 3	395.881,06	9.533.138,13	78,42
PZ-NM-37	4/10/2022	Pozo	Tabatinga	Bairro Brilhante, rua 13 de maio	395.587,09	9.531.236,08	76,44
PZ-NM-38	5/10/2022	Pozo	Tabatinga	Beco rua 13 de maio, casa 68	395.565,04	9.531.225,06	76,71
PZ-NM-39	5/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Marechal Rondon, 2.371	395.848,68	9.533.212,97	76,83
PZ-NM-40	5/10/2022	Pozo	Tabatinga	Armazém Valladares- Rua Marachal Rondón	396.233,66	9.533.369,60	89,00
PZ-DM-43	6/10/2022	Pozo	Tabatinga	Seminário de Tabatinga	397.245,33	9.531.979,10	78,00
PZ-NM-41	6/10/2022	Pozo	Tabatinga	Igreja Senhora Santos Anjos	395.935,66	9.532.500,19	71,00
PZ-NM-42	6/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Pedro Texeira / rua São Pedro	395.432,81	9.532.754,46	64,00
PZ-NM-43	6/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Marechal Rondon, casa 46	395.423,50	9.532.806,66	77,00
PZ-NM-45	6/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Ana Nery, casa 1	395.767,83	9.533.101,09	77,78
PZ-NM-46	6/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Ibirapuera, casa 5	396.442,37	9.531.585,69	91,00
PZ-NM-47	8/10/2022	Pozo	Leticia	Km 8 vía Pichuna	388.620,47	9.549.265,34	82,18
PZ-NM-48	8/10/2022	Pozo	Leticia	Finca El Diamante	388.337,55	9.549.011,76	81,92
PZ-NM-49	10/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Castro Alves	397.927,01	9.532.582,12	78,43
PZ-NM-50	10/10/2022	Pozo	Tabatinga	Villa Verde - Rua Castro Alvez	397.930,25	9.532.603,91	88,00
PZ-NM-51	10/10/2022	Pozo	Tabatinga	Departamento de Limpeza Urbana e Rural - SEMULSPl	396.225,55	9.532.821,21	78,26
PZ-NM-52	10/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Marechal Rondon, 233	395.965,28	9.533.259,21	76,11
PZ-NM-53	11/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Afonso Gomes, Bairro Barbosa	396.573,46	9.532.817,26	87,00
PZ-NM-54	11/10/2022	Pozo	Tabatinga	Bairro Rui Barbosa, rua Afonso Gomes, casa 58	396.542,63	9.532.817,22	81,00
PZ-NM-55	11/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Rui Barbosa, bairro centro, casa 30	396.229,90	9.532.870,61	77,98
PZ-NM-56	11/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Rui Barbosa, 32	396.252,25	9.532.869,15	77,98
PZ-NM-57	12/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Pastor Eliziário, casa 11	398.115,34	9.532.512,01	71,00
PZ-NM-58	12/10/2022	Pozo	Tabatinga	Comunicações - Rua Flavio lucena casa #40	396.944,09	9.532.264,95	57,00
PZ-NM-59	12/10/2022	Pozo	Tabatinga	Autoposto JANGADA - Rua Santos Du mont #114	396.296,76	9.532.172,04	63,00
PZ-NM-60	12/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua da Pátria – São Pedro	395.864,70	9.532.540,03	69,00

Consecutivo	Fecha	Tipo de punto	Municipio	Nombre del lugar	Coordenadas -UTM Zone 19S*		Altura (msnm)
					Este	Norte	
PZ-NM-61	12/10/2022	Pozo	Tabatinga	Rua T-2, casa 76	396.719,22	9.531.963,16	77,46
PZ-NM-62	23/11/2022	Pozo	Tabatinga	Rua Marechal Rondon, 203	395.863,88	9.533.246,57	69,00

* Sistema de referencia por coordenadas EPSG: 31979 SIRGAS-2000 UTM Zone 19S.

Los pozos no alcanzan grandes profundidades, que se ubican entre los 2 y 45 m, con un promedio general de 18 metros; sin embargo, a excepción del punto PZ-DM-02 que corresponde a un aljibe artesanal, el tipo de captación perforado es muy común en la zona de estudio y en gran medida cuentan con las condiciones en infraestructura aceptable que les permite obtener rendimientos eficientes para su uso una vez se destinan para abastecimiento doméstico. La profundidad de 61 de los 68 pozos inventariado en la zona se presenta resumida en la Figura 17.

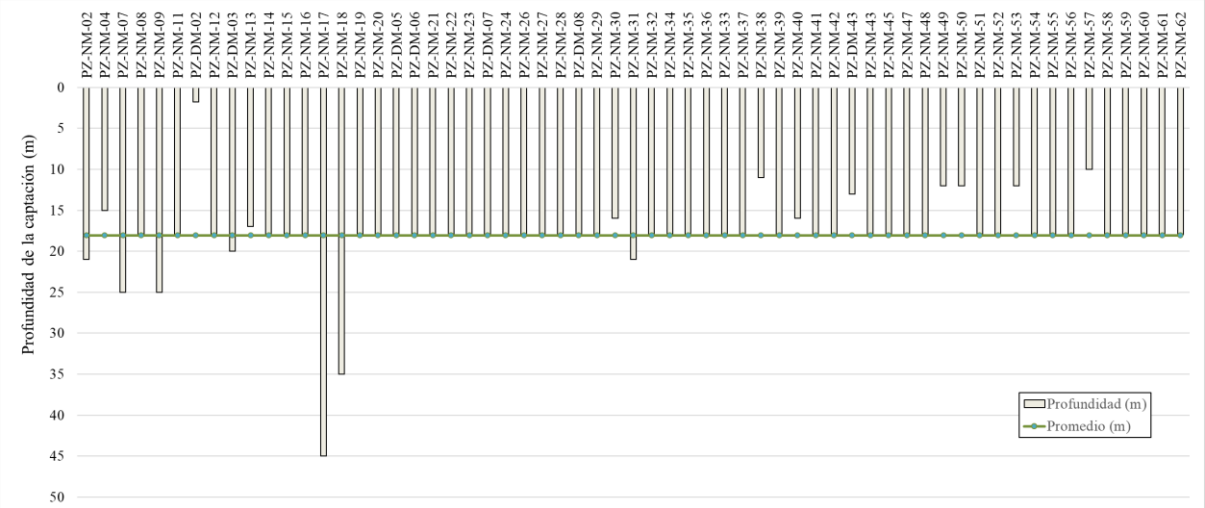


Figura 17. *Análisis de las profundidades de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Es común la presencia de construcciones adicionales a la captación, principalmente tanques de almacenamiento que por lo general se encuentran elevados y que configuran el punto de partida para la distribución (Foto 2). En algunos casos en los cuales la captación se encuentra al interior de las viviendas son empleadas tuberías directas para su aprovechamiento (Foto 3).



Foto 2. *Ejemplo de captación con construcción adicional elevada. Punto de acumulación para distribución. PZ-DM-07. Leticia, Colombia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*



Foto 3. *Punto de captación para uso doméstico directo. PZ-NM-52. Tabatinga, Brasil. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

6.2. Propiedades organolépticas

Las propiedades organolépticas son aquellas que pueden ser percibidas y descritas por los sentidos, como el color y el olor. Durante el inventario se describieron las características organolépticas (apariencia, color y olor) de las aguas de los pozos para tener una idea de la calidad del recurso aprovechado. En la zona predominan las aguas de apariencia clara (94%), mientras que las aguas turbias corresponden únicamente al 6% (Figura 18). De manera similar, en cuanto al color, el 94% de los puntos de agua son incoloras, mientras las aguas amarillas abarcan el 6% restante (Figura 19). Finalmente, el 96% de las aguas son inodoras, en tanto que aguas con olor fétido corresponden al 1% y con olor de óxido abarcan el 3% (Figura 20).

De manera general, el 91% de todos los puntos de agua presentan aguas incoloras, claras e inoloras y solo las aguas amarillas, turbias, e inodoras alcanzan el 4%, el resto de las clasificaciones se presenta en menos del 3% de los puntos. Esto significa que las aguas de los pozos inventariados son casi todas de apariencia limpia que, en caso de tener contaminantes, son imperceptibles a simple vista.

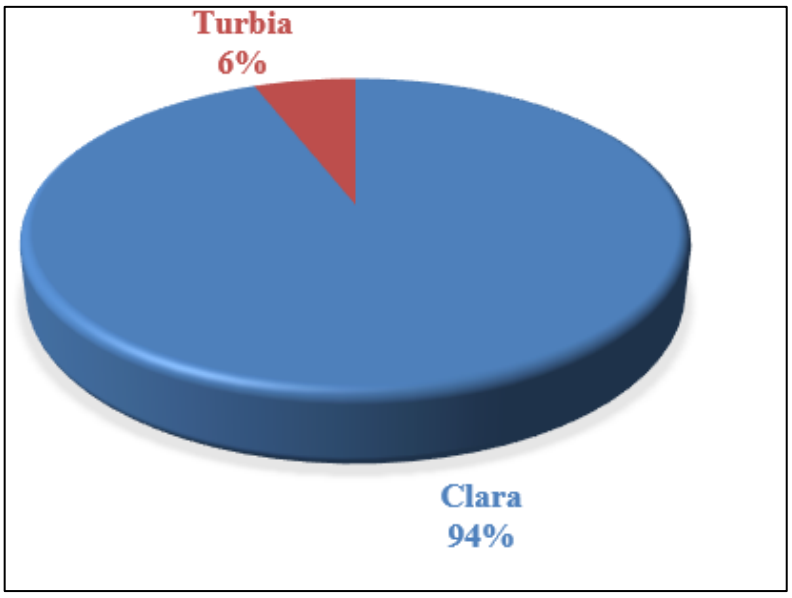


Figura 18. *Apariencia observada de las aguas en las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

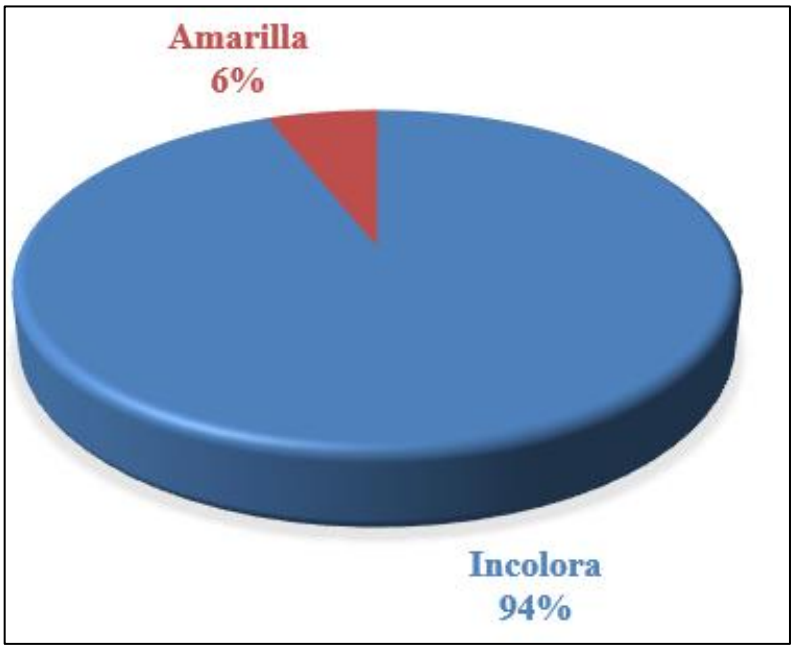


Figura 19. *Colores observados de las aguas en las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

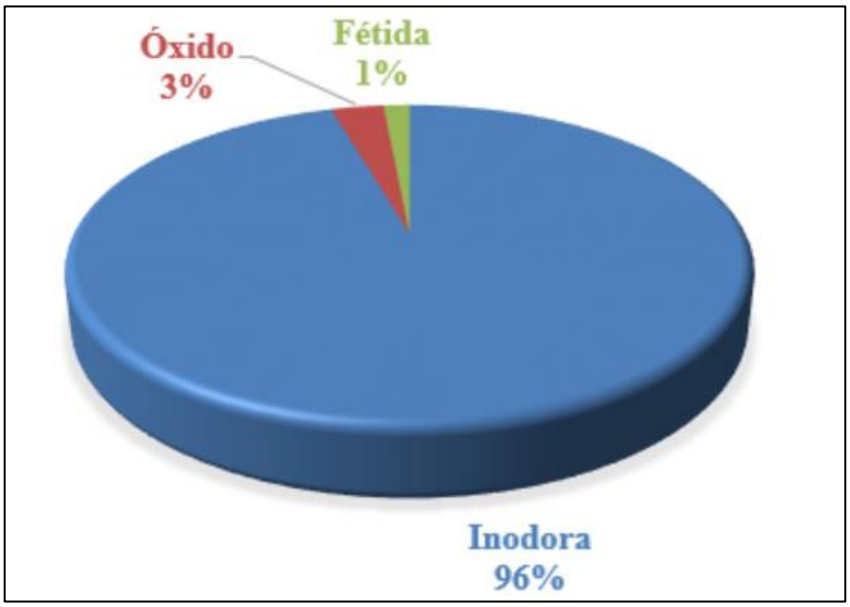


Figura 20. *Olor percibido de las aguas en las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

6.3. Parámetros fisicoquímicos de los puntos de agua

Las condiciones fisicoquímicas de las captaciones asociadas a la actualización del inventario de puntos de agua se presentan en la Tabla 6. Estas condiciones se analizan a continuación.

Tabla 6. *Parámetros fisicoquímicos de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Consecutivo	Tipo de punto	Redox (mV)	Temperatura (°C)	Conductividad (uS/cm)	SDT (mg/l)	Oxígeno disuelto (mg/l)	pH (unidades de pH)	Turbidez (NTU)
PZ-NM-01	Pozo	-49,90	28,80	116,00	52,70	5,44	6,40	28,20
PZ-NM-02	Pozo	141,80	29,80	49,10	21,12	1,28	5,13	15,40
PZ-NM-03	Pozo	189,50	29,60	39,30	16,45	2,77	5,05	0,46
PZ-NM-05	Pozo	56,80	28,10	78,30	34,20	1,87	5,58	14,40
PZ-NM-06	Pozo	178,30	29,90	111,10	45,70	6,11	5,34	0,50
PZ-NM-07	Pozo	179,70	27,80	108,90	48,00	5,58	5,36	0,49
PZ-DM-01	Pozo	22,40	26,90	86,10	40,70	3,73	5,79	15,40
PZ-NM-08	Pozo	191,30	27,50	96,50	43,20	3,29	4,78	0,92
PZ-NM-09	Pozo	177,10	28,30	38,00	16,53	2,10	4,87	0,61
PZ-NM-11	Pozo	171,30	28,40	151,40	66,60	3,71	4,19	3,42
PZ-DM-02	Aljibe	88,30	31,40	155,40	74,50	1,19	5,92	24,10
PZ-NM-12	Pozo	145,00	29,30	38,30	16,50	4,50	4,48	101,00
PZ-DM-03	Pozo	71,40	32,20	76,20	36,30	4,02	5,28	3,69
PZ-NM-13	Pozo	126,80	28,60	16,76	7,26	2,32	4,86	0,67
PZ-NM-14	Pozo	139,80	29,50	137,10	58,00	5,02	4,29	2,35
PZ-NM-15	Pozo	120,40	26,90	56,80	26,70	2,91	4,00	4,15
PZ-NM-16	Pozo	158,90	27,30	43,60	20,34	4,52	4,86	2,07
PZ-NM-17	Pozo	123,90	27,40	28,20	13,26	3,70	5,24	1,26
PZ-NM-18	Pozo	132,10	29,00	88,10	41,80	5,78	5,63	0,70
PZ-NM-19	Pozo	262,40	29,30	110,40	52,40	4,14	4,24	2,95
PZ-DM-05	Pozo	202,50	28,80	11,15	5,16	3,94	5,10	7,38
PZ-DM-06	Pozo	146,50	30,20	28,20	13,40	5,38	5,64	0,33
PZ-NM-21	Pozo	115,30	29,20	33,10	14,07	2,14	5,24	2,69
PZ-NM-22	Pozo	127,10	28,60	154,20	68,10	1,64	6,55	9,97
PZ-NM-23	Pozo	149,70	28,20	47,80	21,03	3,09	4,83	17,90
PZ-DM-07	Pozo	164,20	28,90	33,60	16,07	6,00	5,84	2,33

Consecutivo	Tipo de punto	Redox (mV)	Temperatura (°C)	Conductividad (uS/cm)	SDT (mg/l)	Oxígeno disuelto (mg/l)	pH (unidades de pH)	Turbidez (NTU)
PZ-NM-24	Pozo	174,60	27,90	58,40	25,80	3,36	4,64	0,73
PZ-NM-25	Pozo	186,80	27,70	114,50	51,20	3,10	4,49	0,33
PZ-NM-26	Pozo	173,30	28,90	47,00	20,31	3,32	4,52	0,92
PZ-NM-27	Pozo	187,40	29,20	19,83	8,47	2,56	4,47	1,42
PZ-NM-28	Pozo	178,50	29,10	111,30	48,20	5,42	4,17	3,78
PZ-NM-29	Pozo	96,30	28,10	121,80	57,70	2,48	5,50	0,98
PZ-NM-30	Pozo	175,40	26,30	19,43	9,00	4,66	5,02	3,22
PZ-NM-31	Pozo	183,90	26,00	18,83	8,89	3,19	5,01	7,33
PZ-NM-32	Pozo	159,60	26,90	19,96	9,27	3,80	4,87	3,85
PZ-NM-47	Pozo	190,30	28,20	50,20	21,30	2,26	5,51	9,20
PZ-NM-48	Pozo	160,20	27, 8	52,00	22,60	3,02	5,38	7,15
PZ-DM-08	Pozo	199,90	30,30	61,60	28,90	7,35	6,64	21,30
PZ-DM-43	Pozo	145,90	28,10	67,30	29,50	6,51	6,10	27,20
PZ-NM-20	Pozo	180,60	30,70	64,60	29,70	5,70	4,77	0,14
PZ-NM-33	Pozo	194,30	28,50	194,20	92,40	4,11	4,37	6,10
PZ-NM-34	Pozo	173,40	29,70	120,40	56,80	2,54	4,52	5,54
PZ-NM-35	Pozo	174,10	28,80	164,90	78,40	3,39	4,56	6,91
PZ-NM-36	Pozo	169,20	28,80	98,50	46,30	3,81	4,55	50,60
PZ-NM-37	Pozo	160,90	28,00	186,30	88,40	5,18	4,66	1,94
PZ-NM-38	Pozo	218,10	28,20	79, 5	35,00	4,73	4,79	15,70
PZ-NM-39	Pozo	215,30	30,00	171,40	72,80	2,96	4,41	48,00
PZ-NM-40	Pozo	213,70	29,60	213,60	89,80	1,24	3,98	3,72
PZ-NM-41	Pozo	169,90	28,90	80,30	37,90	2,05	5,05	0,70
PZ-NM-42	Pozo	179,10	29,00	139,80	61,00	6,04	4,40	1,08
PZ-NM-43	Pozo	179,10	29,00	137,40	59,50	3,46	4,56	0,42
PZ-NM-45	Pozo	150,90	29,40	106,90	45,80	5,11	5,44	4,61
PZ-NM-46	Pozo	171,30	29,70	90,60	38,70	3,43	4,40	14,50
PZ-NM-49	Pozo	44,60	28,20	98,90	43,80	1,74	5,62	31,30

Consecutivo	Tipo de punto	Redox (mV)	Temperatura (°C)	Conductividad (uS/cm)	SDT (mg/l)	Oxígeno disuelto (mg/l)	pH (unidades de pH)	Turbidez (NTU)
PZ-NM-50	Pozo	131,90	27,90	40,50	17,67	2,65	4,61	0,29
PZ-NM-51	Pozo	164,70	28,60	91,20	38,40	4,26	4,35	0,22
PZ-NM-52	Pozo	168,70	30,00	107,10	45,50	4,66	4,21	11,70
PZ-NM-53	Pozo	173,00	27,90	121,70	54,80	2,20	4,33	0,24
PZ-NM-54	Pozo	171,60	27,80	98,80	43,90	5,02	4,36	0,81
PZ-NM-55	Pozo	162,70	28,70	107,50	47,10	5,18	4,45	3,22
PZ-NM-56	Pozo	181,80	28,60	86,30	37,50	2,10	4,28	0,79
PZ-NM-57	Pozo	150,00	28,80	66,30	28,60	3,66	4,80	0,27
PZ-NM-58	Pozo	152,30	27,60	41,40	18,30	5,81	4,62	2,00
PZ-NM-59	Pozo	186,20	27,70	285,00	129,20	2,69	4,40	1,16
PZ-NM-60	Pozo	154,90	28,80	34,60	15,04	5,21	4,53	6,20
PZ-NM-61	Pozo	142,10	28,60	147,10	64, 80	2,84	5,76	2,80
PZ-NM-62	Pozo	198.50	26.10	241.00	112.10	4.25	4.57	1.08

- pH

El pH de las captaciones inventariadas oscila en un rango entre 3,98 y 6,64 unidades de pH, en su mayoría con clasificaciones de aguas ácidas a ligeramente ácidas, como se presenta en la Figura 21. El promedio del pH se encuentra en 4,93 y la mayoría de los puntos levantados se encuentran por debajo dicho valor.

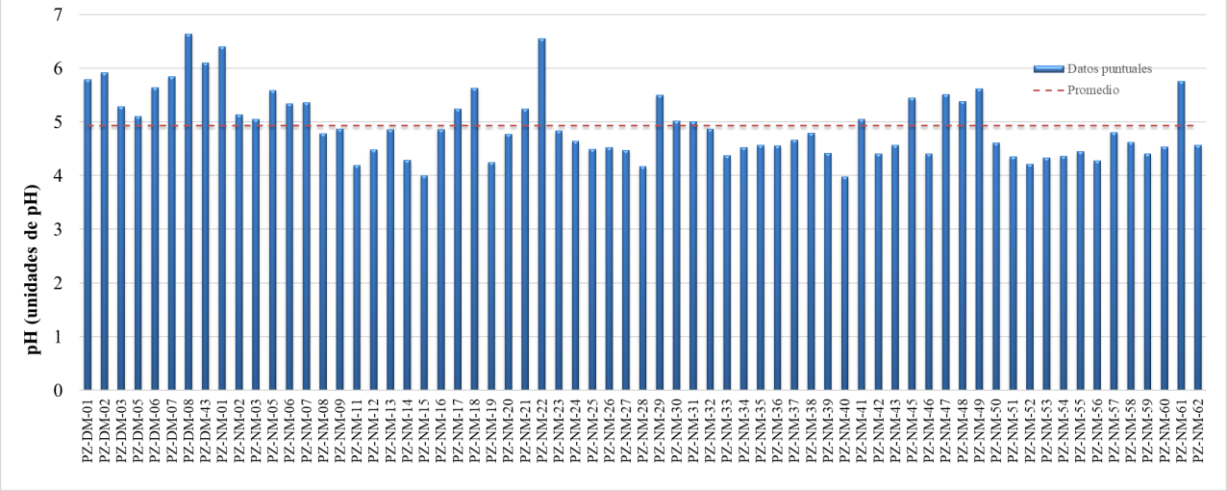


Figura 21. *Análisis del pH de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

La distribución espacial del pH de las captaciones se presenta en la Figura 22. Al tratarse de un parámetro tan homogéneo, los puntos no muestran una zonificación clara, predominando valores entre las 4 y 5 unidades de pH, con un ligero aumento del pH al norte del municipio de Leticia, y en algunos puntos al oriente de Tabatinga.

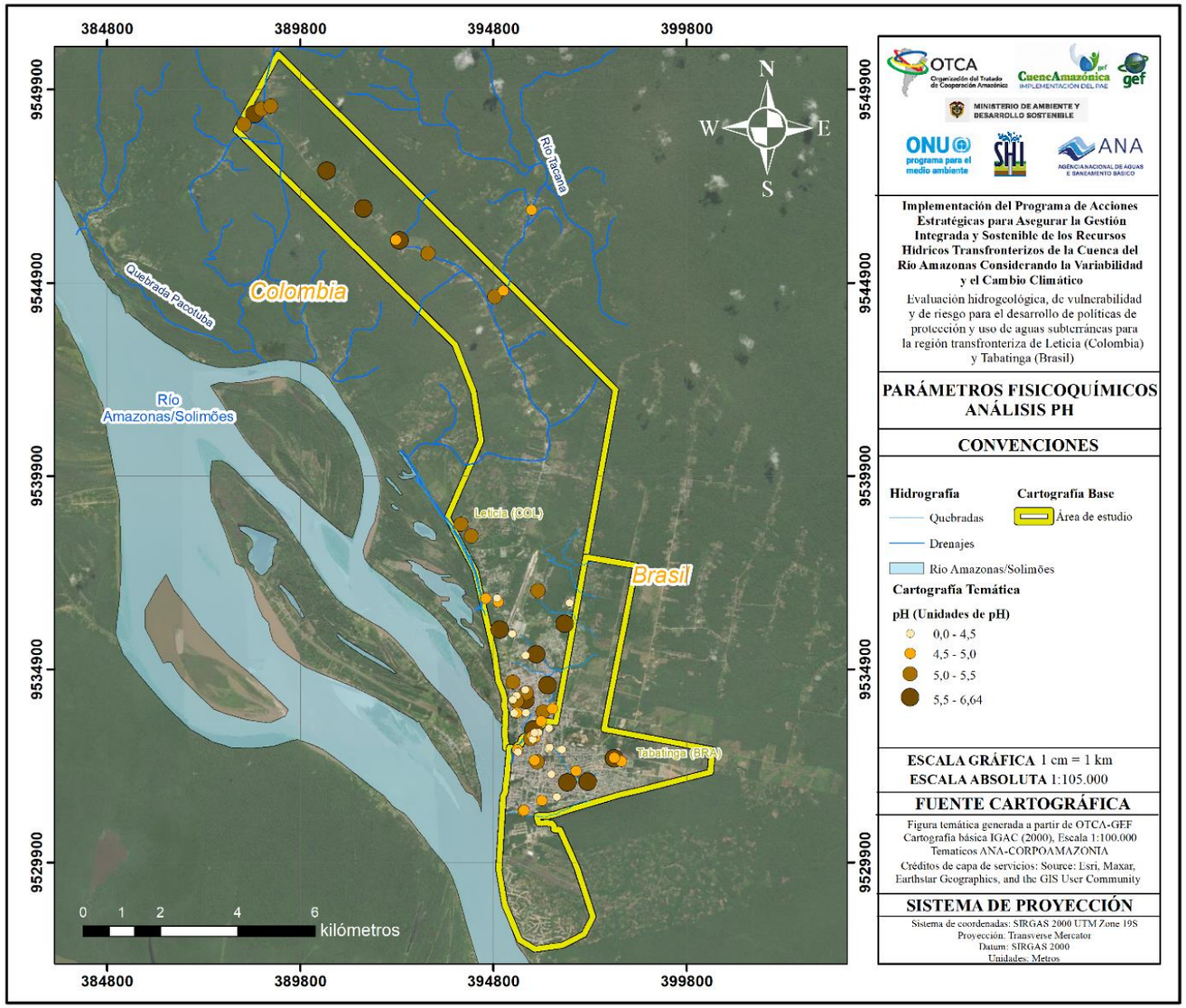


Figura 22. *Distribución espacial del pH de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Temperatura**

El valor del pH se relaciona íntimamente con la temperatura a la que se encuentra la solución. En este caso los valores de temperatura se reportan en °C, tal como se presenta en la Figura 23 y oscilan entre los 26 y los 32,2 °C, influenciados por el contexto climático cálido de la zona. La temperatura promedio registrada en las captaciones es de 28,6 °C.

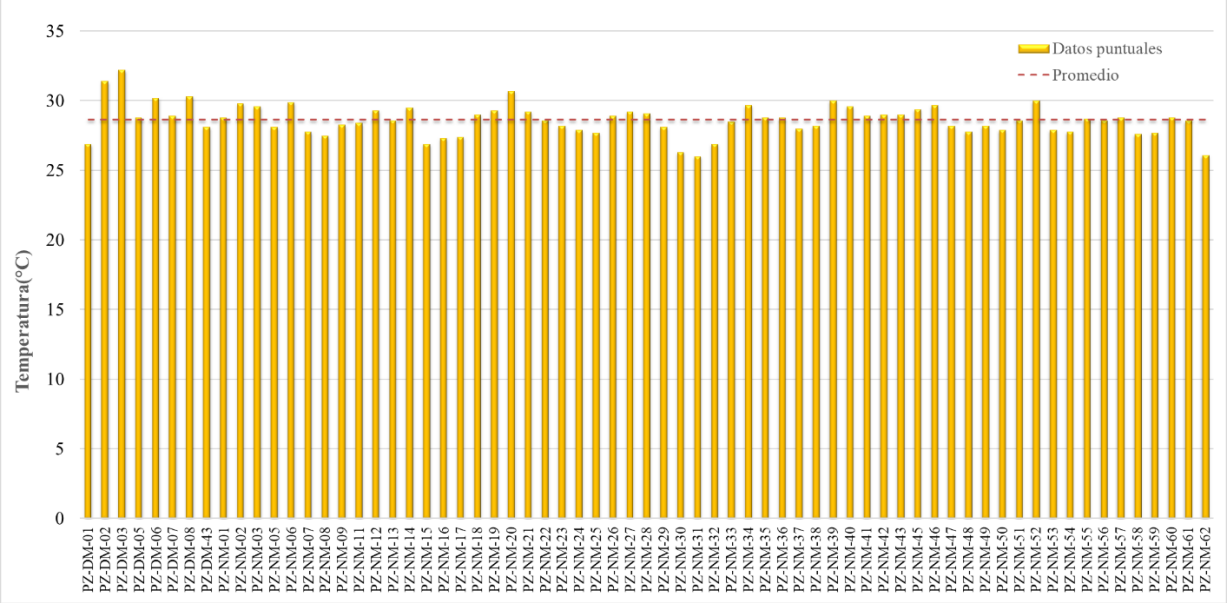


Figura 23. *Análisis de la temperatura de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

La distribución espacial de la temperatura de las captaciones se presenta en la Figura 24. Al igual que en el análisis del pH, al tratarse de un parámetro tan homogéneo, los puntos no muestran una zonificación determinante, con ligeros aumentos en las cercanías a la zona de inundación más próxima del río Amazonas, al occidente de la zona, y algunos puntos al sur del municipio de Tabatinga, donde los valores se encuentran por encima de los 30°C.

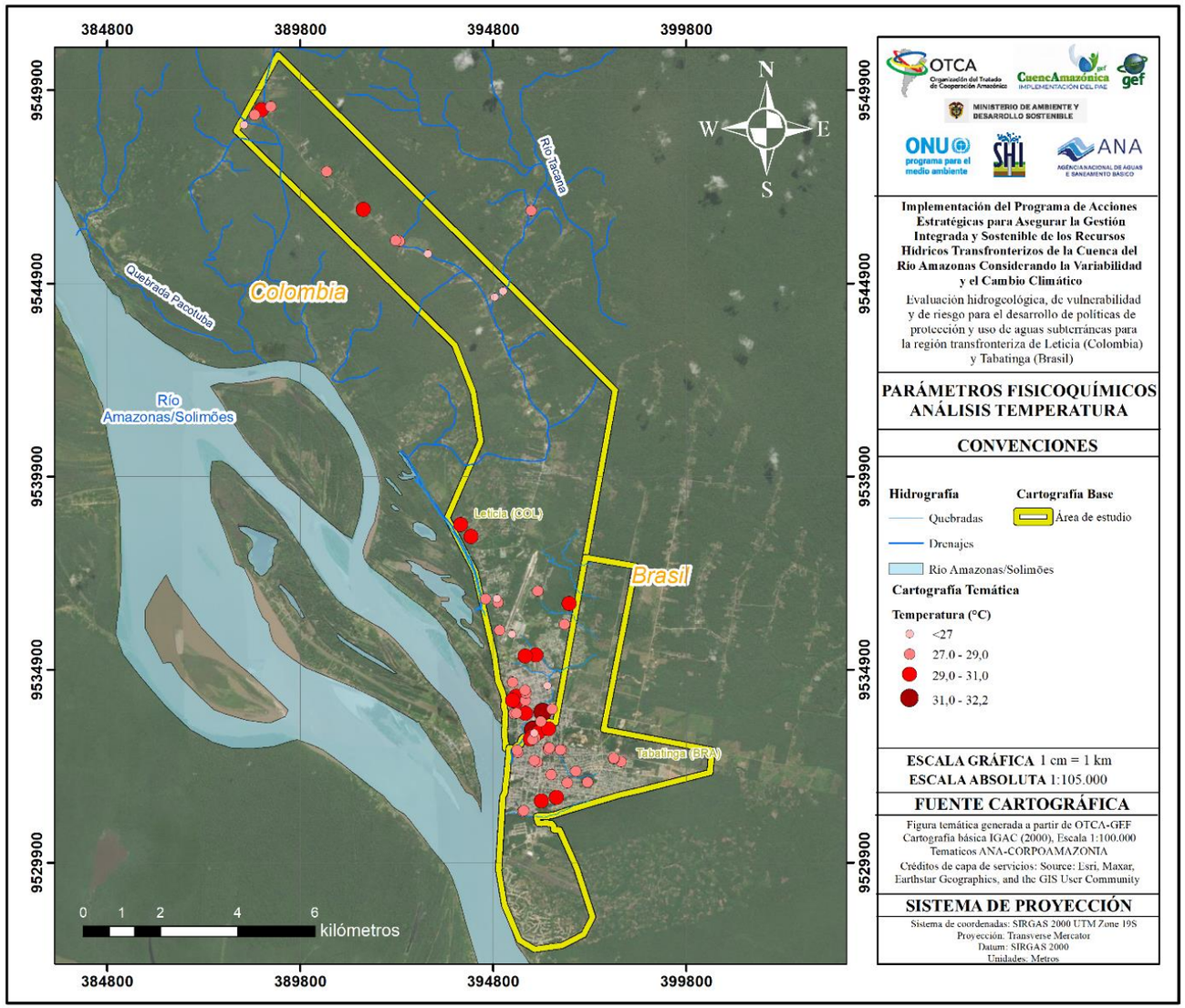


Figura 24. *Distribución espacial de la temperatura de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto en la zona oscila entre 1,9 y 7,3 mg/l, con un promedio de 3,78 mg/l. En su mayoría, los puntos ubicados en Leticia se encuentran debajo de la media, con un promedio de 3,60 mg/l mientras que en Tabatinga los valores de oxígeno disuelto son levemente superiores, con un promedio de 4,00 mg/l (Figura 25), valores propios de aguas subterráneas, sin embargo, valores inferiores pueden indicar problemas de contaminación biológica, hipótesis detallada en los muestreos físico-químicos y sus respectivos análisis.

También cabe resaltar que algunos de los valores más altos reportados corresponden a puntos donde el muestreo se ejecutó en sistemas de tubería previas al almacenamiento y no a boca de pozo, lo que imprime circulación y oxigenación al recurso.

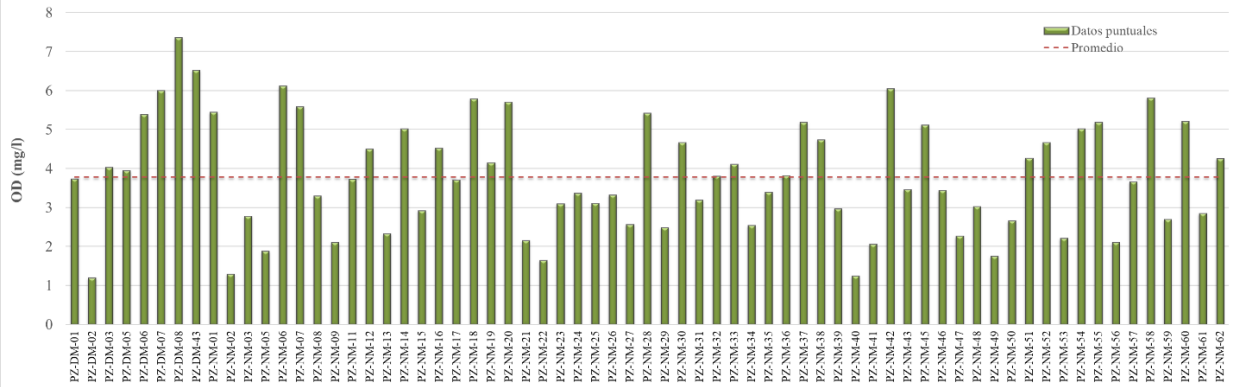


Figura 25. *Análisis del oxígeno disuelto de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

La distribución espacial del oxígeno disuelto registrado en las captaciones se presenta en la Figura 26 y exhibe una tendencia de aguas más oxigenadas en las captaciones de los cascos urbanos, donde posiblemente el uso activo del recurso hídrico permite una renovación constante del mismo, sumado a la interacción activa con el río Amazonas y otros drenajes superficiales. Adicionalmente, se observa que los puntos ubicados al noroccidente del municipio de Leticia también presentan valores relativamente altos, mientras que puntos ubicados más al oriente de del casco urbano de Tabatinga tienden a presentar los valores más bajos, cercanos a los 2 mg/l.

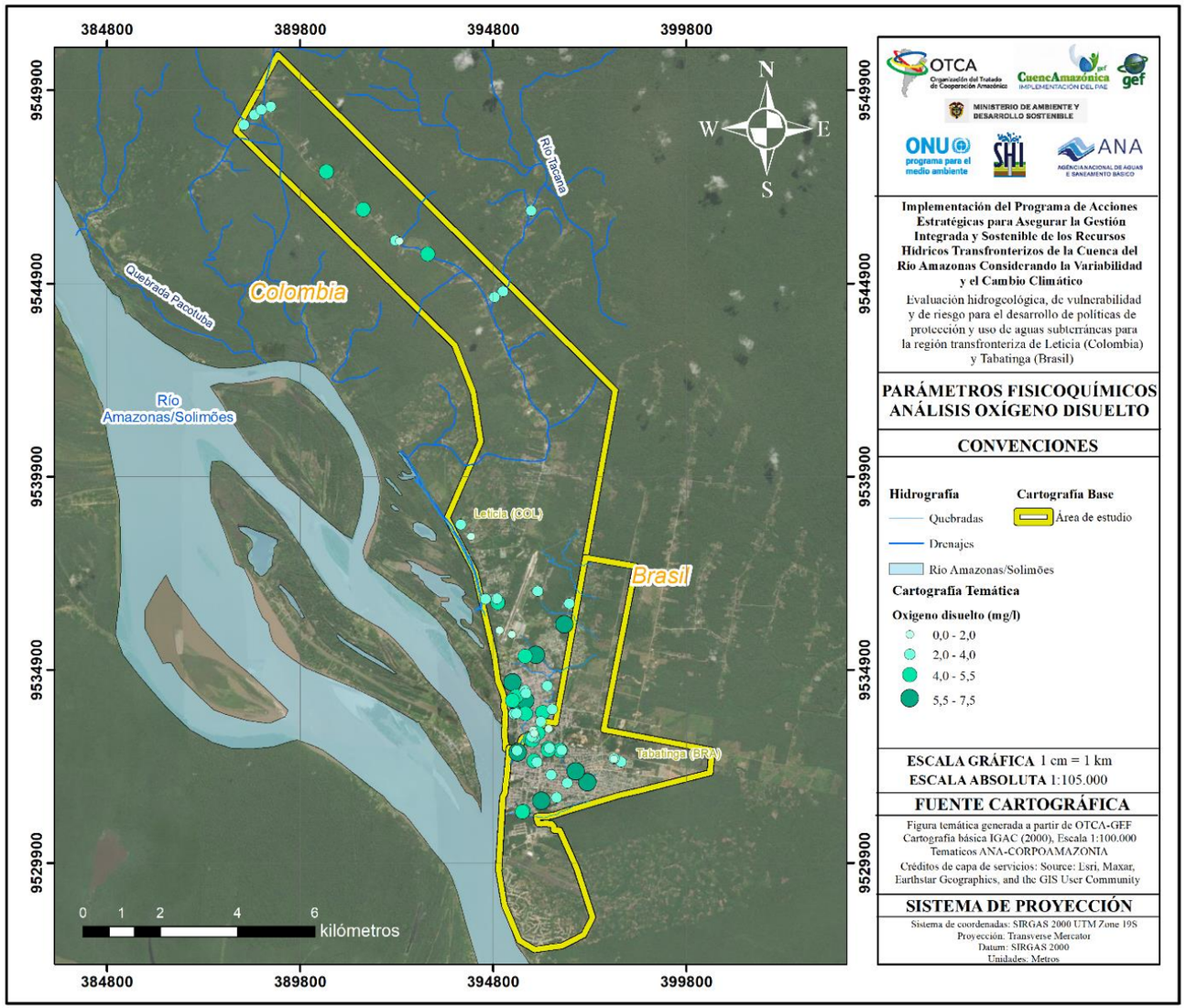


Figura 26. *Distribución espacial del oxígeno disuelto de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales**

En el área de estudio, los valores de conductividad eléctrica presentan registros variables, entre los 11 y 285 µS/cm (Figura 27), sugiriendo la conectividad con cuerpos de agua superficial y precipitación que se infiltra rápidamente. Estos valores presentan un promedio de 91 µS/cm, valor bajo para agua subterránea y donde gran parte de los datos se encuentran por debajo de dicha media. Además, los valores de SDT oscilan entre los 5 y 129 mg/l, arrojando un promedio de 40,5 mg/l, coherentes con los registros y análisis presentados.

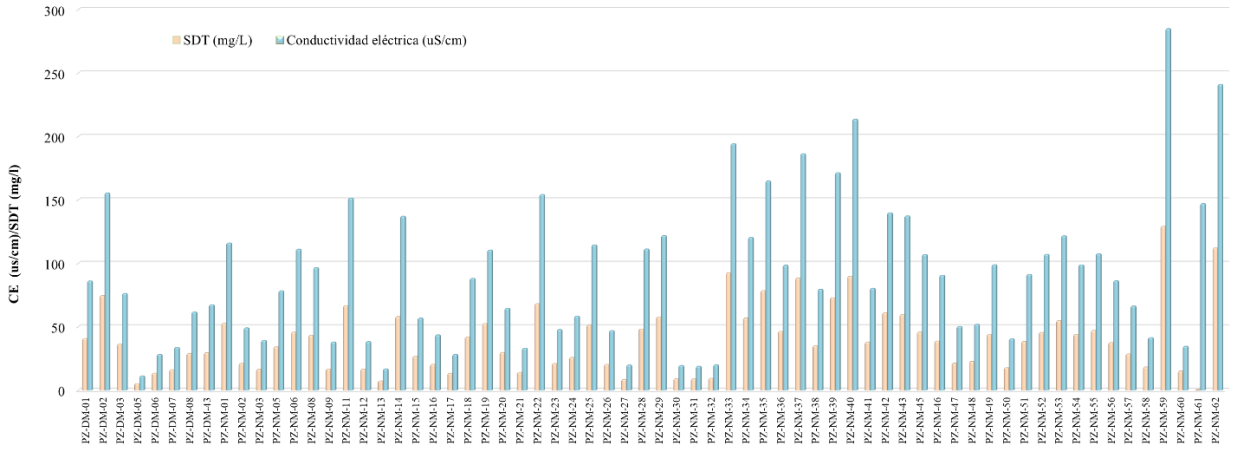


Figura 27. *Análisis de la conductividad eléctrica y solidos disueltos totales en las captaciones inventariadas. Fuente OTCA & SHI SAS(2023).*

La distribución espacial de la conductividad eléctrica de las captaciones se presenta en la Figura 28, y la asociada a los sólidos disueltos totales en la Figura 29. De manera general, la zonificación muestra que los puntos de mayor conductividad eléctrica se ubican al sur del municipio de Tabatinga, y al occidente del municipio de Leticia. Los puntos de conductividad eléctrica más baja se ubican sobre la zona rural del municipio del Leticia, al norte y noroccidente del polígono de estudio.

Esta distribución de Sólidos Disueltos Totales en las muestras puede provenir principalmente de procesos de contaminación o malas condiciones sanitarias de la infraestructura del pozo.

.

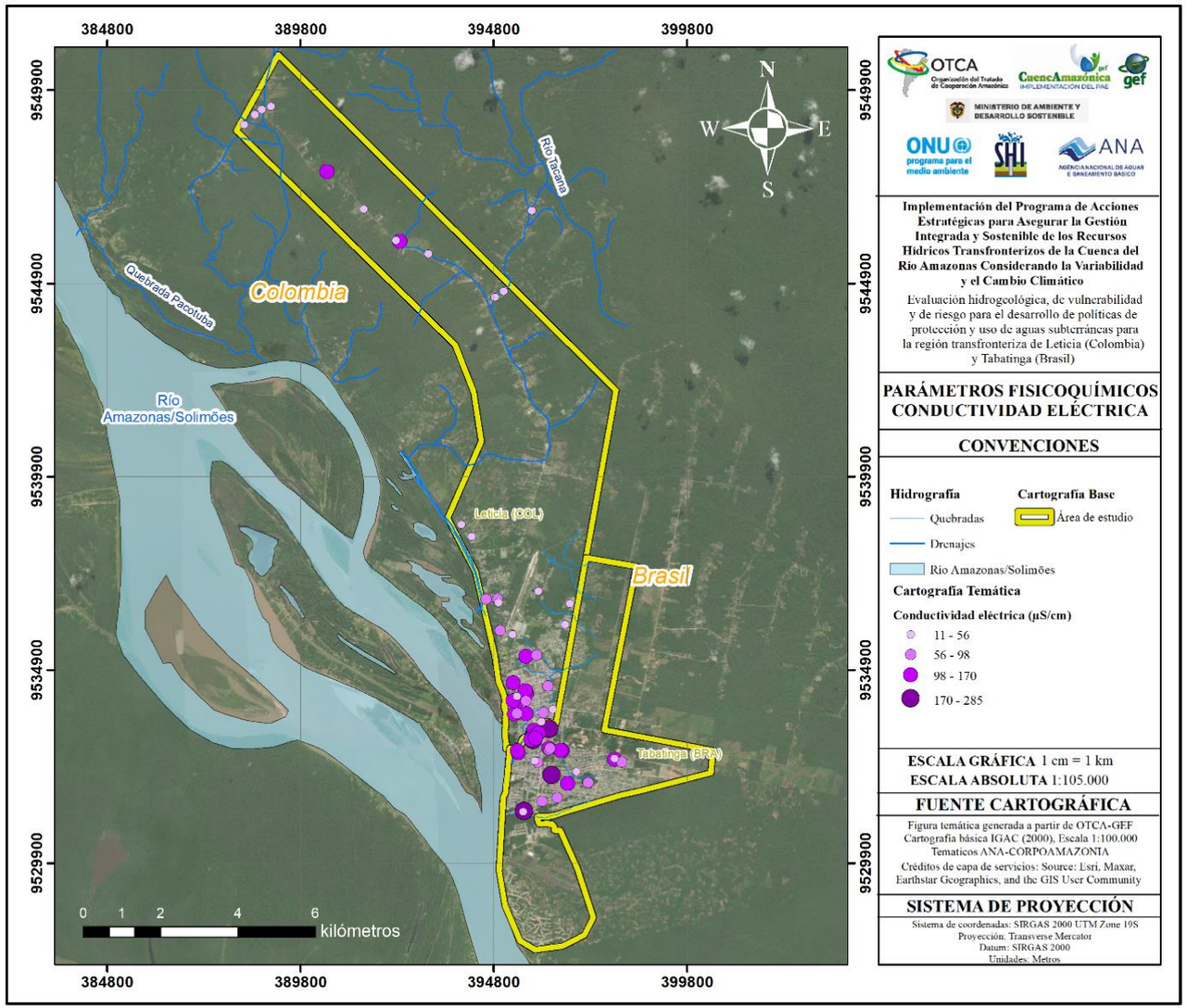


Figura 28. *Distribución espacial de la conductividad eléctrica de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

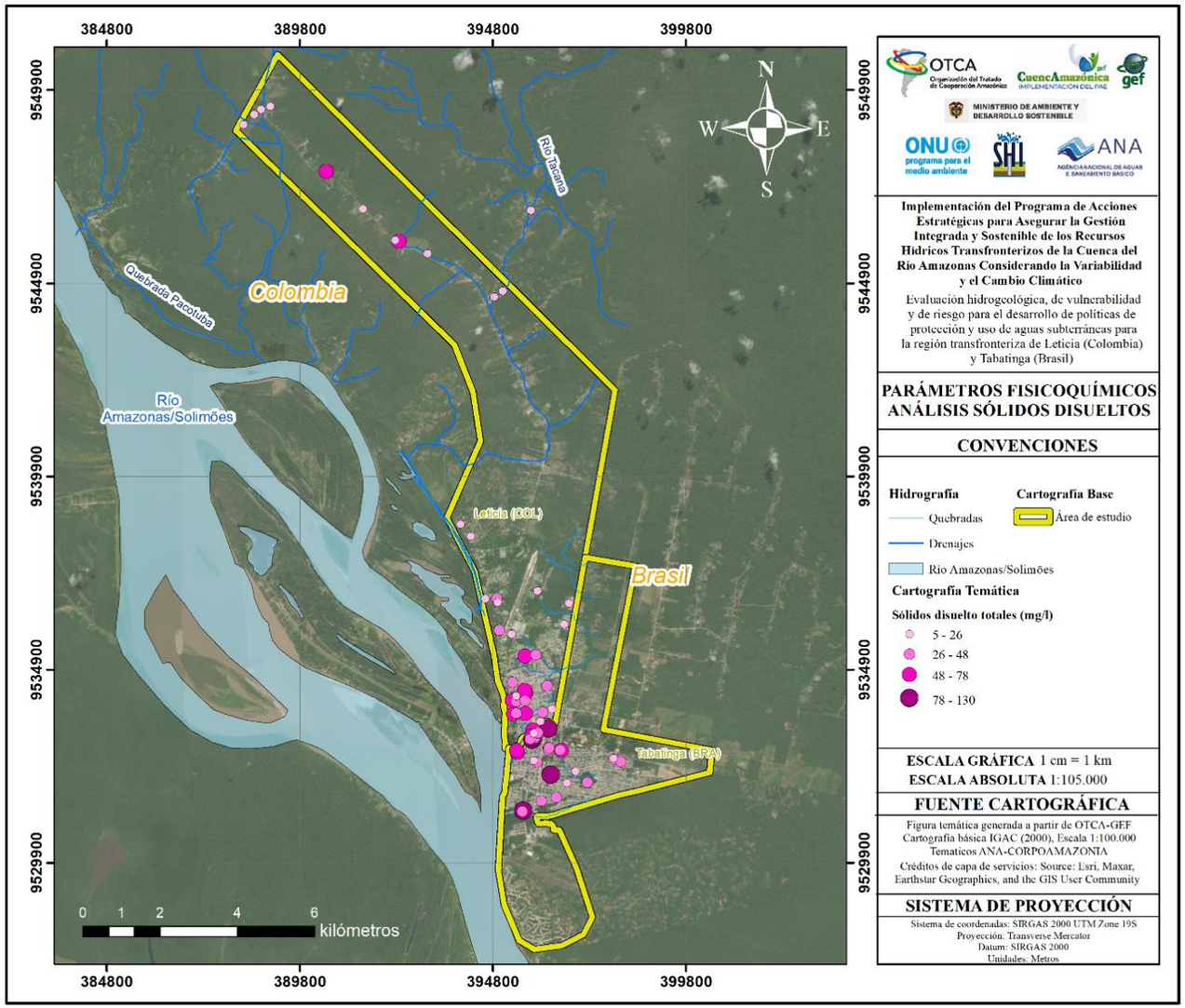


Figura 29. *Distribución espacial de los sólidos totales de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Potencial Redox**

En general, los valores de Redox son predominantemente positivos entre 22 y 262,4 mV, con un único valor negativo con potencial reductor de -49,9 mV. Este parámetro puede dar indicios de las condiciones sanitarias de la captación, donde valores más altos indican presencia de agentes contaminantes (Figura 30).

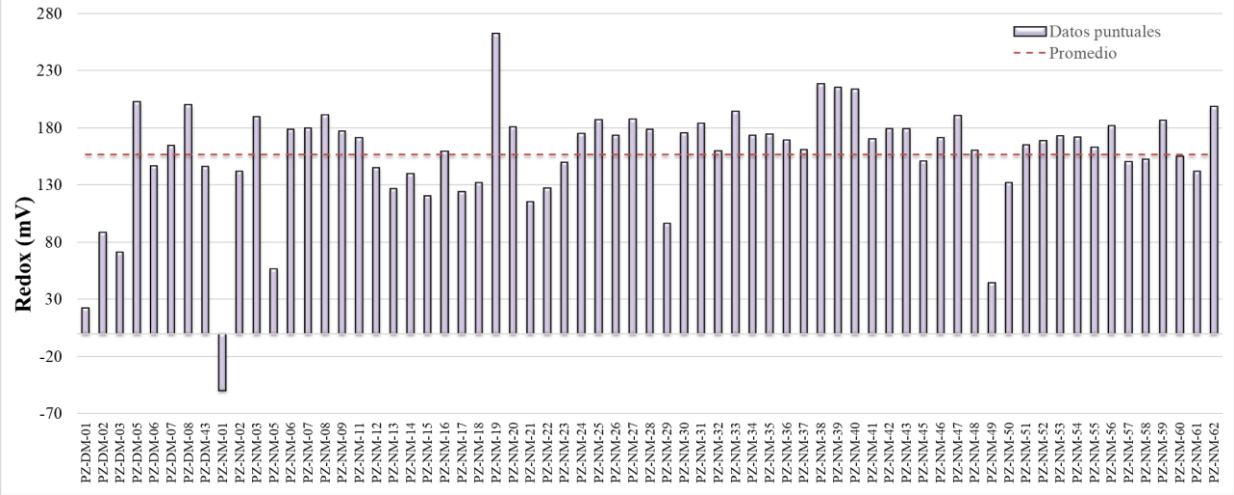


Figura 30. *Potencial redox de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

La distribución espacial del redox de las captaciones se presenta en la Figura 31. Del mismo modo que en los demás parámetros la distribución no muestra una tendencia clara a lo largo de la zona de estudio. Sin embargo, es importante destacar que el único valor negativo bajo condiciones reductoras se encuentra muy cercano a la zona de influencia del actual botadero del municipio de Leticia, al noroccidente del polígono de interés.

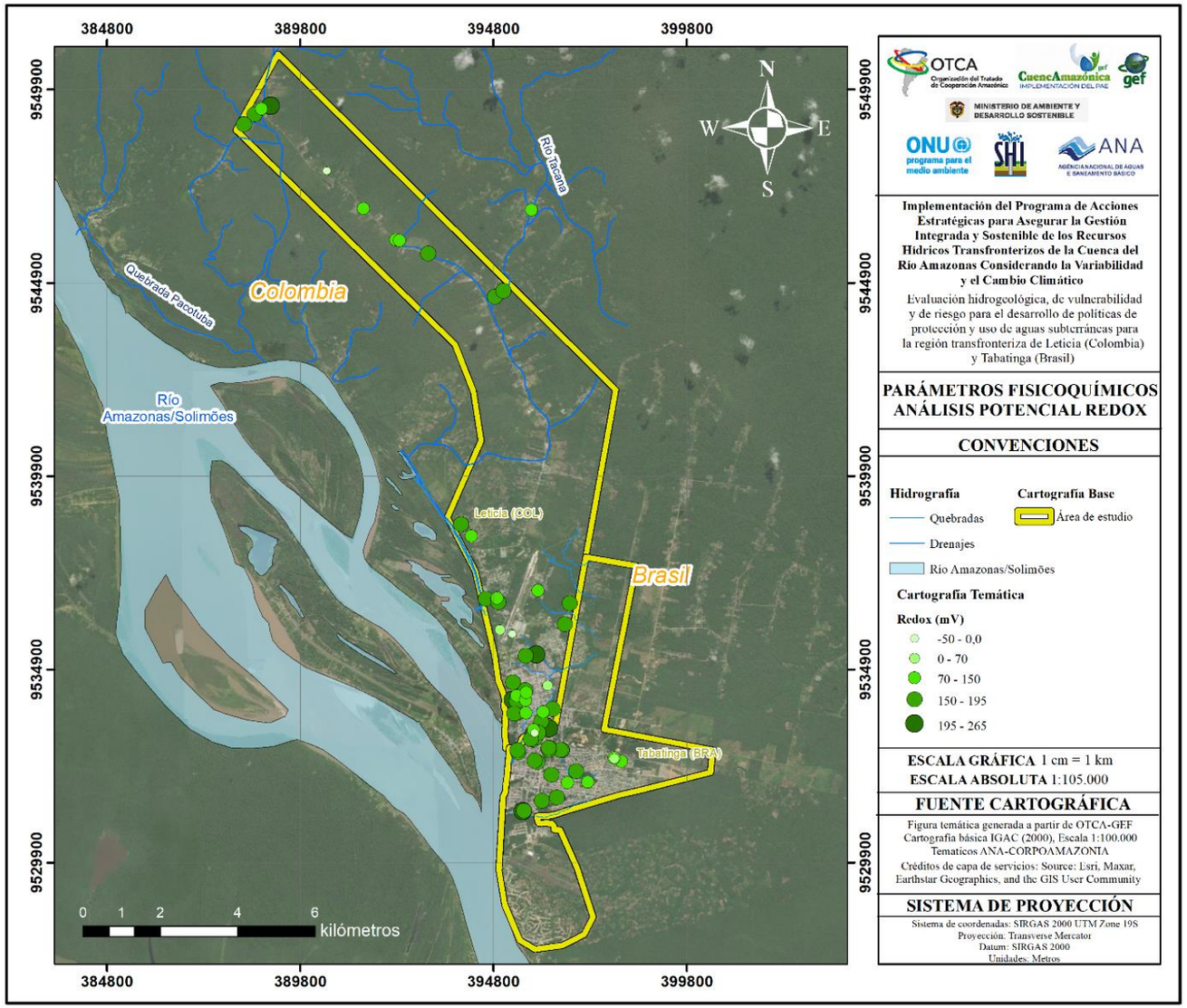


Figura 31. *Distribución espacial del potencial redox de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Turbidez**

La medición de la turbidez está íntimamente relacionada con la eficacia de los procesos de desinfección en el mantenimiento del pozo y la cantidad de material particulado en suspensión en el agua de las captaciones. Este parámetro oscila en un rango amplio entre 0,1 y 101 NTU, con un promedio de 8,55 NTU. Es importante destacar que la mayoría de los datos se encuentran por debajo de dicho valor, tal como se presenta en la Figura 32.

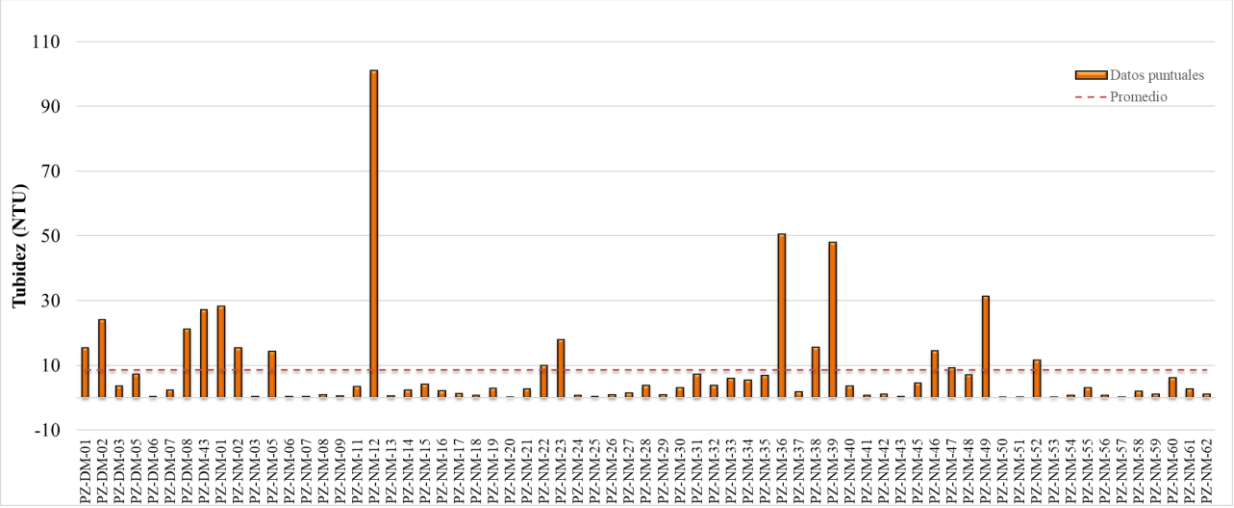


Figura 32. *Turbidez de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

La distribución espacial de la turbidez de las captaciones se presenta en la Figura 33. En este caso, se presenta un comportamiento relativamente homogéneo, con valores bajos de turbidez alrededor de las captaciones del casco urbano de los municipios de Leticia y Tabatinga, y un ligero aumento al norte y noroccidente de la zona de estudio. Este comportamiento puede deberse a procesos de renovación constante del recurso captado y las condiciones sanitarias de las captaciones.

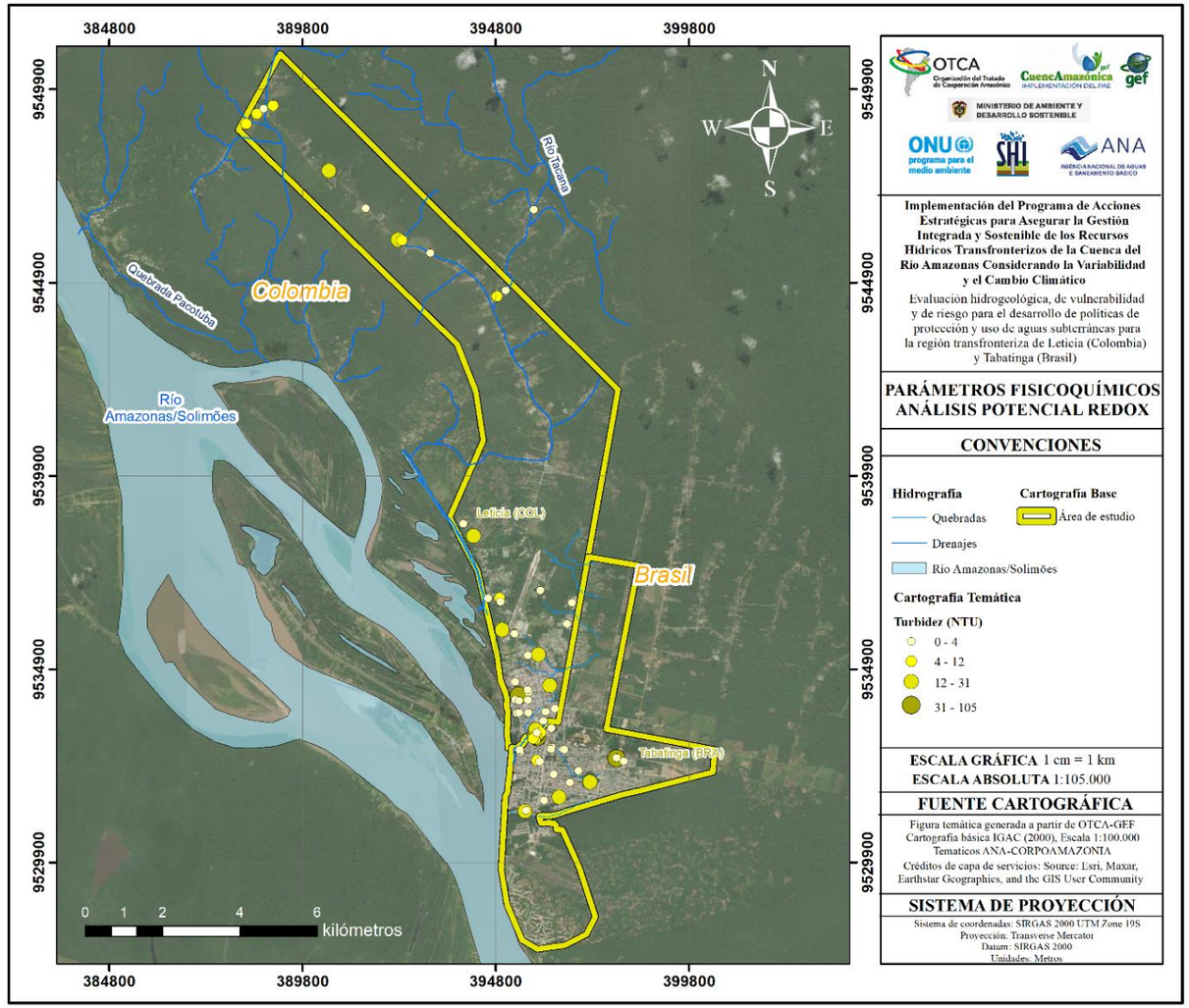


Figura 33. *Distribución espacial de la turbidez de las captaciones inventariadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

6.4. Análisis sanitario de las captaciones

Tal como se mencionó en la parte introductoria, en general las captaciones y sus puntos de extracción reflejan características muy similares en método de perforación y extracción y en infraestructura tanto para la distribución y uso, como para garantizar condiciones sanitarias mínimas.

Este análisis parte de la consolidación de los datos obtenidos para los 68 puntos que conforman la base de datos actualizada en campo, como requerimiento de ambos formatos de levantamiento implementados durante la elaboración del inventario de puntos de agua. Allí se consigna información de la captación referente a 4 puntos clave en términos de diagnóstico sanitario de las captaciones; (1) El cerramiento exterior o cerco alrededor del punto, (2) piso de cemento alrededor del punto, (3) Tapa alrededor del punto de captación y/o succión, y finalmente (4) la presencia o no de un sello sanitario en la infraestructura entubada.

A partir del diagnóstico disponible sobre los pozos, se asigna una clasificación porcentual en partes iguales del 25% para cada parámetro mencionado, y se consolida su nivel de cumplimiento en 3 rangos de la siguiente manera:

Han sido categorizados como “No cumple”, aquellos puntos donde ninguna o solo una de las condiciones sanitarias básicas se presenta en correspondencia con valores 0 y 25%. Por su parte, la categoría “cumple parcialmente” integra aquellos puntos donde se presentan 2 o 3 condiciones sanitarias básicas y hace referencia a valores de 50 y 75%. Finalmente, han sido categorizados como “Cumple totalmente” aquellos puntos que presentan las cuatro condiciones mínimas de sanidad que corresponde a valores de 100%. El resumen de esta clasificación en función a los datos obtenidos del inventario se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. *Resumen del análisis sanitario de las captaciones. Clasificación en rangos porcentuales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Clasificación	Número de puntos
No cumple	**10**
Cumple parcialmente	**11**
Cumple totalmente	**46**

El 69% de los puntos inventariados cumple con las cuatro condiciones mínimas de la infraestructura, seguido del 16% asociado a 11 puntos donde se cumplen al menos 2 condiciones sanitarias, y finalmente 10 puntos que representan el 15% restante de la distribución no cumplen con las condiciones mínimas de sanidad en la captación. El análisis porcentual se presenta en la Figura 34.

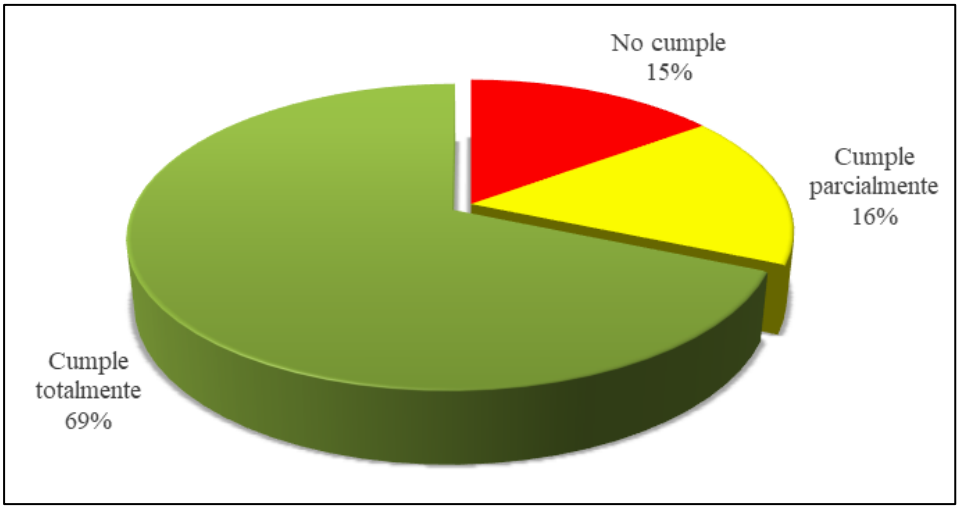


Figura 34. *Análisis porcentual de las condiciones sanitarias de la captación. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Adicional al análisis referente a las condiciones de infraestructura, para cada punto se evaluó la cercanía de la captación a las fuentes puntuales de contaminación, tal y como lo especifican los FUNIAS para Colombia; además se incluye en este análisis la evaluación de las fuentes potenciales de contaminación inventariadas en un radio de 150 metros a la redonda del punto de captación, encontrándose que únicamente 9 puntos se ubican en la cercanía a estas, así: 2 vertimientos de aguas residuales domésticas, 2 estaciones de servicio, dos pozos sépticos domésticos y dos pozos de agua abandonados. El punto restante se asocia con la relativa cercanía del punto PZ-NM-01 (800 metros de distancia) al relleno sanitario de la ciudad de Leticia (FC-DM-01).

6.5. Usos y usuarios del recurso hídrico

Los usos del agua subterránea, según IDEAM, INGEOMINAS & MAVDT (2009) se clasifican en: **abastecimiento público**, cuando el agua se emplea para consumo humano, sea rural o urbano; uso **doméstico**, cuando el número de usuarios en inferior a 10 y se emplea para satisfacer las necesidades domésticas como higiene personal y limpieza de elementos o utensilios, sin embargo, no incluye las aguas destinadas a consumo humano; **industrial**, cuando se utiliza para actividades tales como procesos manufactureros, minería, generación de energía u otra actividad industrial; y **recreativo**, cuando se utiliza el agua en actividades de ocio. Adicionalmente, se encuentra el uso para **consumo humano y doméstico,** el cual es mencionado en el decreto 1076 de 2015 (Republica de Colombia, 2015), en el cual se agrupan los usos de agua **colectivos** como colegios, entidades educativas, entidades gubernamentales, iglesias, entre otras entidades identificadas en la zona.

Por otro lado, según la legislación vigente en Brasil (CONAMA, 2008; BRASIL, 2021), las aguas subterráneas tienen los siguientes usos: **Consumo humano**: agua potable destinada a la ingestión, preparación y producción de alimentos e higiene personal, independientemente de su origen; **Bebedero de animales:** uso directamente asociado al número de rebaños existentes y al tipo de

cría (extensiva o intensiva) y corresponde a la mitigación de la sed de los animales, mediante la acumulación de agua en embalses (bebederos, lagos, arroyos, presas, tanques), normalmente situadas en el ámbito rural (fincas o explotaciones con ganado), pero también toda la demanda de agua asociada a su ganadería; **Riego**: uso asociado al cultivo de grandes cultivos donde se utilizan pivotes centrales y técnicas de aspersión; **Recreación**: aguas subterráneas captadas y almacenadas en piscinas, clubes, lagos artificiales destinados a uso deportivo, pesca, ocio y turismo.

En términos de uso del agua subterránea, la actualización muestra una predominancia de fuentes de abastecimiento para uso doméstico seguido por usos para consumo humano y domésticos colectivos y porcentajes importantes doméstico/industrial, que no se evidenciaban en los inventarios de línea base. En menor proporción se encuentran usos de abastecimiento público, doméstico/recreativo y doméstico/pecuario. La mayoría de los puntos fueron caracterizados como activos, encontrando únicamente 2 pozos abandonados y un pozo inactivo. La distribución porcentual del uso de la captación se presenta en la Figura 35 donde, de los 65 puntos activos, en 13 se implementan bombas sumergibles generalmente con procesos automatizados (Foto 4), en 51 se emplean motobombas convencionales, comúnmente acompañadas de tanques elevados (Foto 5) y para el caso del aljibe se hace una extracción manual (Foto 6).

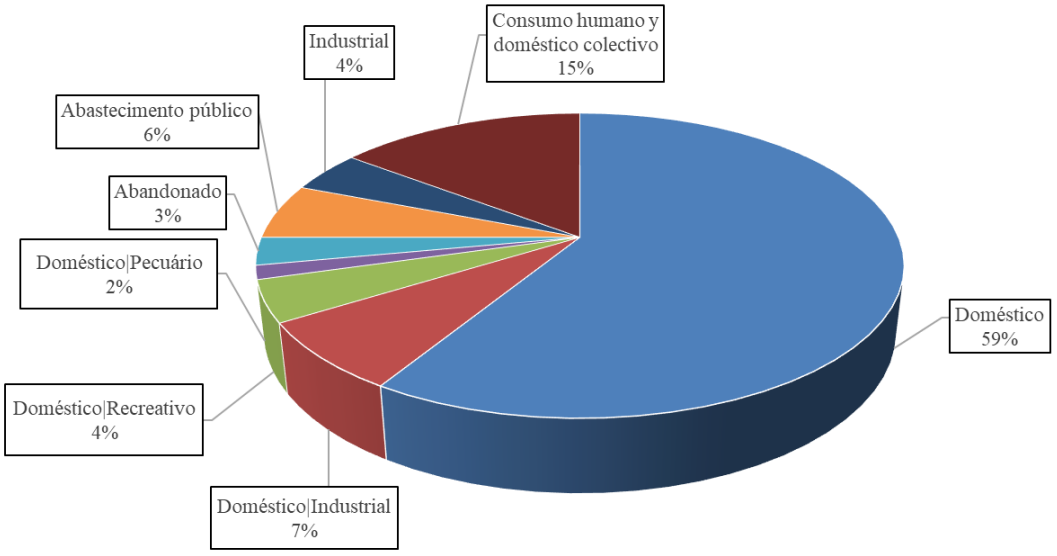


Figura 35. *Distribución porcentual del uso de las captaciones. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*



Foto 4. *Sistema de bomba sumergible automatizado. PZ-NM-12. Leticia, Colombia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*



Foto 5. *Sistema de extracción por motobomba e infraestructura de almacenamiento. PZ-NM-51. Tabatinga, Brasil. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*



Foto 6. *Extracción manual en aljibe. PZ-DM-02. Leticia, Colombia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

El número de usuarios fue obtenido a partir de la información suministrada en campo; para los casos en los que la persona responsable de atender la visita no conocía este dato, la cantidad de usuarios fue estimada a partir del tipo de establecimiento y según los valores típicos para la zona. El registro de los usuarios del recurso hídrico subterráneo arrojó los resultados presentados en la Tabla 8 y Figura 36. Se puede observar que, aproximadamente el 52% de los usuarios se asocia con usos para consumo humano y doméstico colectivos, seguido por un 26% que corresponde a abastecimiento público y un 13% a usos con fines domésticos/recreativos. El 9% restante se asocia a las demás categorías.

La especificación de los usuarios asociados a cada punto se encuentra en **Anexo_03_PuntosDeAgua.**

Tabla 8. *Resumen del análisis de los usuarios del recurso hídrico subterráneo en las captaciones. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Uso	Número de puntos	Usuarios Leticia	Usuarios Tabatinga	Usuarios totales
Doméstico	40	63	129	192
Doméstico Industrial	5	203	0	203
Doméstico Recreativo	3	700	0	700
Doméstico Pecuario	1	11	0	11
Abandonado	2	4	0	4
Abastecimiento público (consumo)	4	1.366	0	1.366
Industrial	3	7	20	27
Consumo humano y doméstico colectivo	10	2.737	0	2.737
Total	**68**	**5.091**	**149**	**5.240**

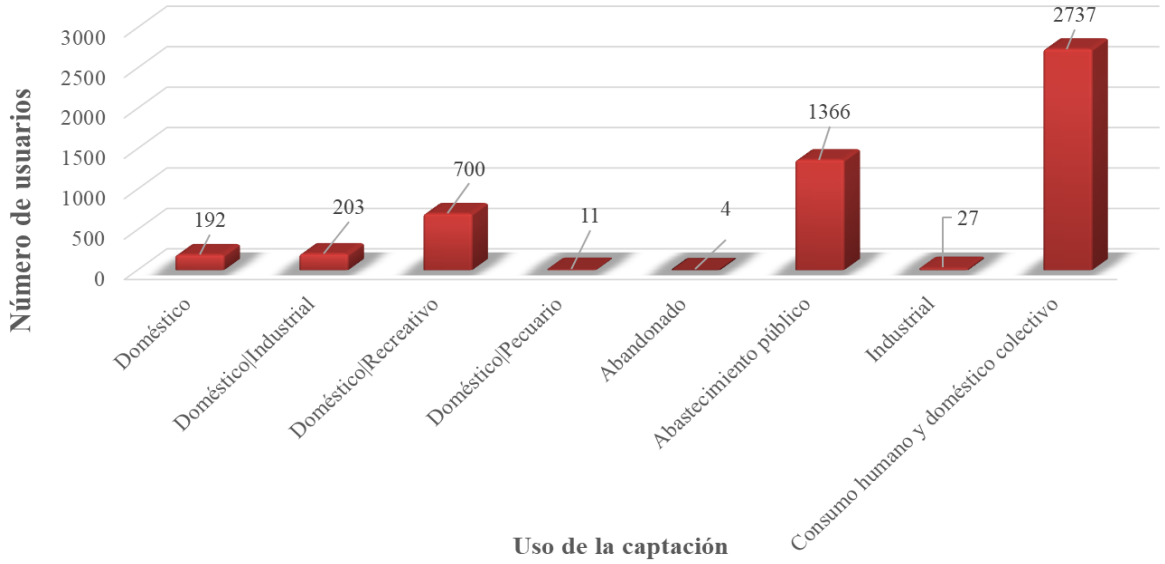


Figura 36. *Análisis grafico del **número de usuarios por tipo de uso**. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

6.6. Actualización de niveles piezométricos

Como parte de los trabajos de levantamiento en campo, se reportan los niveles medidos en las captaciones en la Tabla 9. Se obtuvieron un total de 44 datos de niveles de agua subterránea que oscilan entre los 1,3 y los 13 metros de profundidad, siendo similares a los reportados en la bibliografía, con ligeras tendencias a profundizarse en los últimos años. El nivel promedio se encuentra entre los 5 y 6 metros aproximadamente.

Es importante recalcar que los datos en donde no se registra nivel medido, corresponde a pozos generalmente automatizados, con sistemas de tuberías internas selladas que impiden el ingreso de la sonda.

Tabla 9. *Registro de niveles medidos durante la actualización del inventario de puntos de agua. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Captación	Municipio	Profundidad (m)	Nivel medido (m)	Unidad geológica
PZ-NM-02	Leticia	21	7	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-04	Leticia	15	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-07	Leticia	25	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-08	Leticia	18	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-09	Leticia	25	6,72	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-11	Leticia	18	6,92	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-DM-02	Leticia	1,8	1,6	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-12	Leticia	18	6,25	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-DM-03	Leticia	20	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-13	Leticia	17	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-14	Leticia	18	8,11	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-15	Leticia	18	7,6	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-16	Leticia	18	6,95	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-17	Leticia	45	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-18	Leticia	35	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-19	Leticia	18	8,2	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-20	Tabatinga	18	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-DM-05	Leticia	18	6,2	Fm Pebas/ Solimões
PZ-DM-06	Leticia	18	5	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-21	Leticia	18	6,02	Fm Pebas/ Solimões
PZ-NM-22	Leticia	18	2,16	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-23	Leticia	18	2,2	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-DM-07	Leticia	18	4	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-24	Leticia	18	10,3	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-26	Leticia	18	4,8	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-27	Leticia	18	4,15	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-28	Leticia	18	4,2	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-DM-08	Leticia	18	2,98	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-29	Leticia	18	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-30	Leticia	16	4,5	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-31	Leticia	21	7,64	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-32	Leticia	18	4,81	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-34	Tabatinga	18	4	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-35	Tabatinga	18	8	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-36	Tabatinga	18	7,6	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-33	Tabatinga	18	6,9	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-37	Tabatinga	18	9,22	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-38	Tabatinga	11	10,2	Depósitos aluviales (Qal)

Captación	Municipio	Profundidad (m)	Nivel medido (m)	Unidad geológica
PZ-NM-39	Tabatinga	18	6,44	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-40	Tabatinga	16	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-41	Tabatinga	18	6,38	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-42	Tabatinga	18	6	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-DM-43	Tabatinga	13	4	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-43	Tabatinga	18	6	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-45	Tabatinga	18	8,93	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-47	Leticia	18	13	Fm Pebas/ Solimões
PZ-NM-48	Leticia	18	---	Fm Pebas/ Solimões
PZ-NM-49	Tabatinga	12	1,35	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-50	Tabatinga	12	2,39	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-51	Tabatinga	18	4,3	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-52	Tabatinga	18	4,6	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-53	Tabatinga	12	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-54	Tabatinga	18	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-55	Tabatinga	18	6,36	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-56	Tabatinga	18	4,61	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-57	Tabatinga	10	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-58	Tabatinga	18	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-59	Tabatinga	18	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-60	Tabatinga	18	---	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-61	Tabatinga	18	2,47	Depósitos aluviales (Qal)
PZ-NM-62	Tabatinga	18	1,6	Depósitos aluviales (Qal)

Estos 44 datos de nivel obtenidos fueron contrastados con los 61 pozos y la profundidad de la captación consignados en el inventario, el resumen grafico se presenta en la Figura 37.

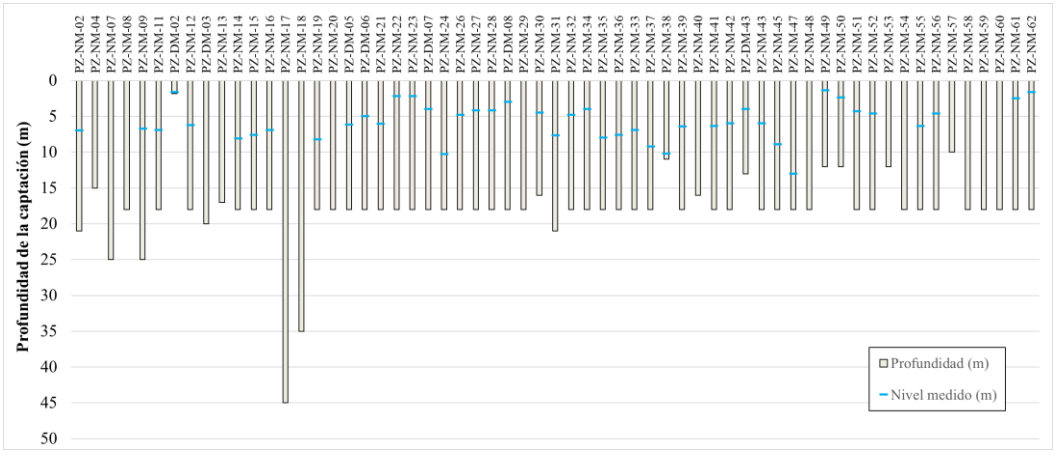


Figura 37. *Análisis gráfico de la profundidad de la captación vs. nivel freático medido en las captaciones inventariadas.*

Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).

7. DEMANDA DE AGUA SUBTERRÁNEA

El análisis de abastecimiento actual de agua potable en las ciudades de Leticia y Tabatinga consiste en identificar cuáles son las principales fuentes de abastecimiento del recurso en la región y conocer sus características técnicas: calidad, cantidad y cobertura.

La estimación actual y futura de la demanda hídrica subterránea se realiza de manera aproximada tomando como base la información censal disponible, la información de consumos y suscriptores de los acueductos principales, los consumos y usuarios registrados en el inventario de puntos de agua según las consideraciones técnicas del reglamento del sector de agua potable RAS 2000 para Colombia (Resolución 2320 de 2009 - MAVDT (2009). Esto último también se aplicó a los datos de Tabatinga debido a que no se encontró normativa similar en materia de estimación de demanda subterránea.

7.1. Fuentes de información

La información requerida para calcular la demanda se obtuvo de diversas fuentes. La información censal de Leticia proviene del DANE (censos 1973 – 2018) y la de Tabatinga proviene del IBGE (censos 1991 – 2018). La información de consumos y suscriptores de Leticia se obtuvo del SUI (años 2003 – 2008) y de la USPDL (año 2022), la de Tabatinga se obtuvo del PMSB de Tabatinga, del IBGE y del PERH del estado del Amazonas (años 2008 y 2018) y de la COSAMA (año 2022). Los usuarios de aguas subterráneas se obtuvieron de diversas fuentes: el inventario de García-Romo (2008), los inventarios de OTCA & SHI (2015), ANA (2015), y de este estudio (año 2022). Las extracciones promedio por captación también se obtuvieron de este estudio (año 2022).

7.2. Limitaciones

La información de la cantidad de usuarios y de los consumos de agua de los acueductos en ambas ciudades es muy limitada. Para Leticia esta información únicamente está reportada consistentemente desde el 2003 al 2008 y se tiene un salto sin información hasta el 2022.

Para Tabatinga, la información de consumos de agua y suscriptores no se encontró en una sola fuente, sino que se encontró, primero, en la *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico* en el portal Cidades del IBGE para los años 2008 y 2018 (IBGE, 2022), y luego se completó con datos del PMSB de Tabatinga del 2018 (Prefeitura de Tabatinga, 2018) y del PERH del estado del Amazonas. El hecho de tener fuentes diferentes de información conlleva a incertidumbres en los datos, pero se consideran apropiados pues provienen de informaciones oficiales. No todos los datos de usuarios y consumos se encontraban discretizados por sectores, por lo que se separó únicamente en población residencial y no residencial.

Para la selección de las metodologías del cálculo de la población, demanda hídrica y dotación en ambas ciudades, se utilizaron las metodologías establecidas por la normatividad colombiana RAS 2000, pues para Tabatinga, se buscaron metodologías oficiales aplicadas a aguas subterráneas en varias resoluciones, leyes y normas del estado del Amazonas, así como guías metodológicas y técnicas del Ministerio de Salud, de la ANA, ABNT y el SNIS, pero no se encontraron.

7.3. Procedimiento de estimación

Primero se proyectó la población de Leticia y Tabatinga a futuro, por separado debido a que los años de los censos en ambas ciudades son distintos, exceptuando el 2018. Luego se estimó la dotación neta actual utilizando los datos de consumos y suscriptores y posteriormente se proyectó a futuro. Se analizaron las dinámicas históricas para entender las tendencias de crecimiento de la población. Después, con la dotación y la población, se calculó la demanda hídrica total actual (año 2022) y futura (tanto superficial como subterránea) del sector residencial y los otros sectores se calculan como porcentaje de este.

La demanda hídrica subterránea actual (año 2022) se calculó utilizando la extracción promedio de agua por captación con base en la información adquirida en los inventarios de puntos de agua subterránea, y la cantidad de usuarios de aguas subterráneas. La proyección a futuro de la demanda de agua subterránea se estimó como un porcentaje de la demanda hídrica total actual, y se calcularon las proyecciones con este porcentaje, usando las proyecciones de la demanda total. El procedimiento completo se encuentra en el **Anexo_00_InformesAntecedentes.**

7.4. Insumos iniciales

El cálculo de la demanda hídrica, tanto superficial como subterránea, requiere de la descripción y el estado de los acueductos, censos de la población, usos y usuarios, y de la cantidad y frecuencia del uso de las aguas subterráneas.

7.4.1. Información sobre el abastecimiento de agua potable

- **Leticia**

Actualmente en Leticia el servicio de acueducto es prestado por la Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios de Leticia (USPDL) que pertenece a la alcaldía y ha operado desde el año 2015 hasta la actualidad. Anterior al 2015, la empresa prestadora era la privada Empuamazonas (desde 2009), y anterior a esta, la encargada era Empoleticia (desde 1982).

El acueducto municipal se abastece de la quebrada Yahuarcaca, captada en el km 2 de la vía Leticia – Tarapacá, a través de un sistema de barcaza tradicional flotante (Foto 7), que capta 85 l/s, y es impulsada por dos motores de 40 HP de potencia. La aducción del sistema es hecha por bombeo a través de una tubería de PVC de 12” (OTCA & SHI SAS, 2015).

El sistema de tratamiento consiste en dos plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) ubicadas a 500 m aguas abajo de la captación, una de floculación, sedimentación y cloración con un caudal de 72 l/s (Foto 8); y una segunda planta de floculación, sedimentación por alta taza, filtro rápido y cloración con caudal de 50 l/s que actualmente no se encuentra en funcionamiento (OTCA & SHI SAS, 2015).

Por su parte, la cobertura del sistema de acueducto es insuficiente; se observa que, para el 2022 la cobertura era del 50,4% (USPDL, 2022), lo que implica un decrecimiento en la cobertura con respecto al 2005, que era del 65,7% (DANE, 2018a). Esto se puede deber a las deficiencias en la infraestructura del acueducto que ocasiona que los usuarios busquen otras fuentes de agua menos intermitentes como las subterráneas.



Foto 7. *Bocatoma en la quebrada Yahuarcaca en Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

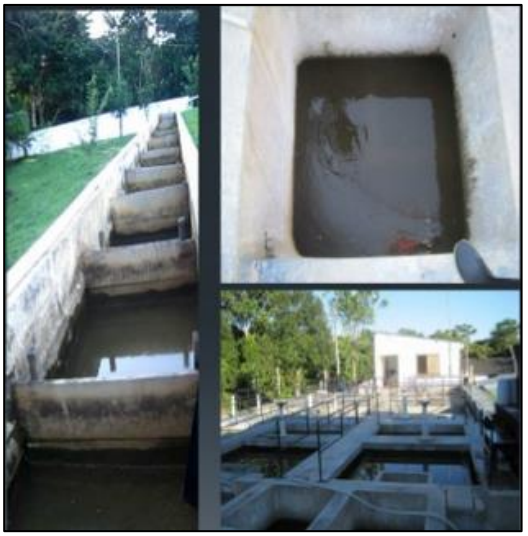


Foto 8. *Planta de tratamiento de agua potable de Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

- **Tabatinga**

El servicio de abastecimiento de agua en Tabatinga está a cargo del gobierno del estado del Amazonas y es operado por la Compañía de Saneamiento del Amazonas (COSAMA) desde el año 2000.

Este acueducto capta las aguas de la margen izquierda del río Amazonas por medio de una casa de bombas flotante de 13,8 x 7,95 m. La red de aducción tiene 154 m de longitud y está compuesta por unas tuberías de caucho armado acopladas a dos redes en paralelo en PVC. El agua es movida por medio de 3 bombas con capacidad nominal individual de 362,2 m^3/h, una bomba es de reserva y dos tienen su operación en paralelo (Prefeitura de Tabatinga, 2018).

El agua es luego conducida a la estación de tratamiento con capacidad nominal de ingreso de 540 m^3/h y realiza procesos de coagulación, floculación, decantación, filtración, desinfección y fluorización (Prefeitura de Tabatinga, 2018).

Esta agua tratada pasa luego al almacenamiento, que es realizado en dos tanques metálicos con capacidad de 1000 m^3 cada uno (Foto 9). Estos tanques están ubicados en el barrio centro en la Av. da Amizade, y desde estos se genera la distribución.

Finalmente, la distribución de agua potable es realizada por medio de tuberías de PVC de aproximadamente 76.364 m de largo (Prefeitura de Tabatinga, 2018). Según COSAMA (2022), la cobertura del servicio de acueducto para el año 2022 era del 80%, lo cual es un porcentaje alto.



Foto 9. *Tanques de almacenamiento de agua en el barrio centro de Tabatinga en el año 2017. Fuente: Prefeitura de Tabatinga (2018).*

Tanto en Leticia como en Tabatinga, una gran parte de la población se abastece de aguas subterráneas y otras fuentes superficiales, por lo que el abastecimiento real puede ser mayor al reportado por los acueductos municipales.

7.4.2. Información de censos poblacionales

- **Leticia**

Para Leticia se tienen disponibles los resultados de los censos realizados por el DANE en los años 1973, 1985, 1993, 2005 y 2018 (Tabla 10 y Figura 38) y la variación de la tasa de crecimiento anual de la población, Figura 39.

La dinámica poblacional (Figura 39) tiene una tendencia creciente, pasando de 8.311 habitantes en 1973 a 42.844 habitantes en 2018. La distribución en zona urbana y rural presenta una tendencia regular, donde la población en zona urbana ha representado entre el 70 y 77% de la población total, y la rural se ha mantenido entre el 22 y el 29%.

La mayor tasa de crecimiento anual para Leticia se presentó en el periodo 1973 – 1985, tanto para la zona urbana como rural (Figura 39). De forma muy contrastante, el período siguiente se presentan las tasas más bajas de crecimiento (1985 – 1993), siendo cercana a cero para la población urbana y negativa para la población rural. Posteriormente, entre 1993 y 2018 se tienen tasas regulares de crecimiento urbano de alrededor del 3%, y la tasa de crecimiento rural entre el 7 y el 1%.

Tabla 10. *Censos de la población de Leticia. Fuente. DANE.*

Año (*)	Población total	Población en zona urbana	Población en zona rural	% Urbana	% Rural	Fuente
1973	8.311	5.849	2.462	70,4%	29,6%	DANE (1973)
1985	24.092	17.005	7.087	70,6%	29,4%	DANE (1985)
1993	22.866	17.758	5.108	77,7%	22,3%	DANE (1993)
2005	32.450	23.194	9.256	71,5%	28,5%	DANE (2005)
2018	42.844	32.220	10.624	75,2%	24,8%	DANE (2018b)

* La información se ha obtenido de los censos conciliados y disponibles públicamente.

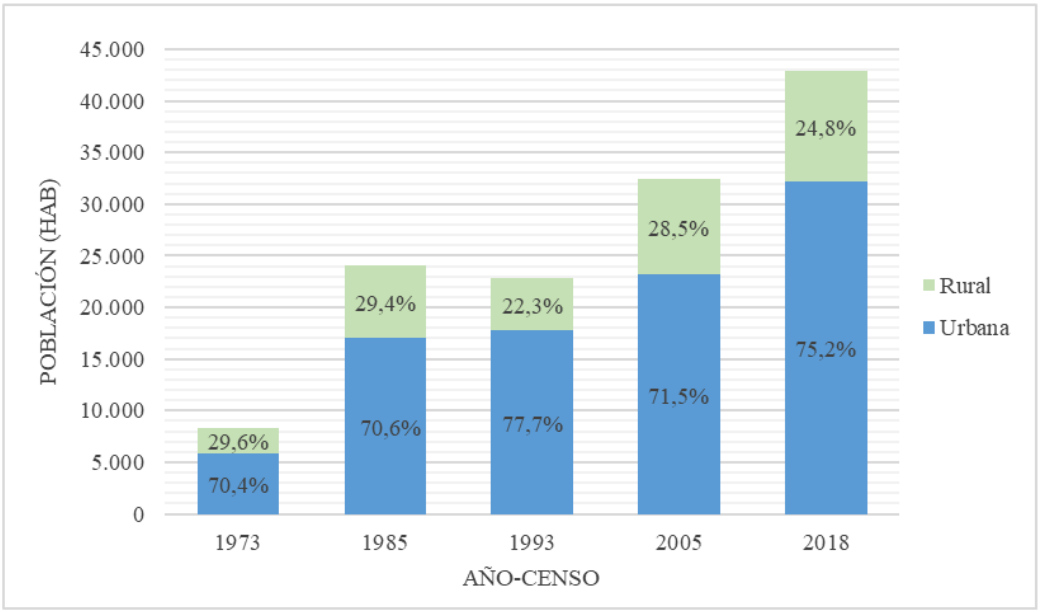


Figura 38. *Crecimiento poblacional en Leticia según los censos de 1973, 1985, 1993, 2005 y 2018. Fuente: DANE.*

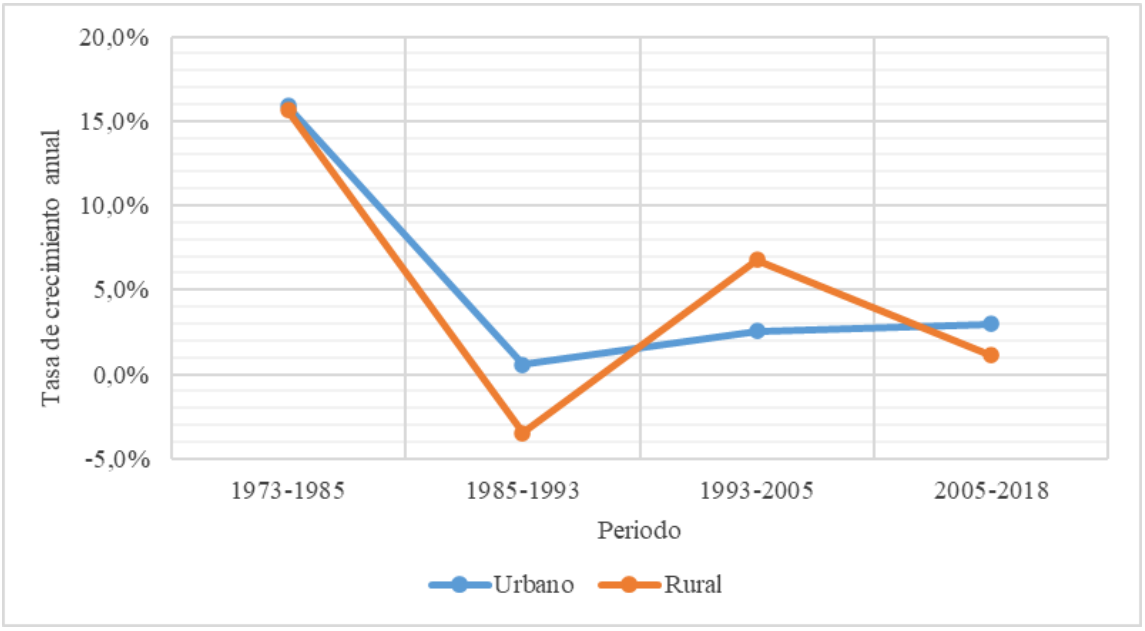


Figura 39. *Variación de la tasa de crecimiento anual de la población de Leticia. Fuente: DANE.*

- **Tabatinga**

Para Tabatinga, se tienen disponibles los censos de población del IBGE en los años 1991, 2000 y 2010 y los datos de población en 2018 reportados en el PERH del estado del Amazonas

(PERH/AM) (Tabla 11), los crecimientos poblacionales (Figura 40), y la variación de las tasas de crecimiento (Figura 41).

La tendencia de la población es creciente, pues se pasó de 27.923 habitantes en 1991 a 64.488 en 2018. La población urbana de Tabatinga se mantiene alrededor del 70% y la rural alrededor del 30% del total. Ahora, en la Figura 41, se evidencia que las tasas de crecimiento poblacional urbano en Tabatinga disminuyeron entre 1991 y 2018 pues pasaron de 3,8 a 2,3%, mientras que la zona rural mantiene una tasa de 4%, esto demuestra un crecimiento leve pero estable de la población.

Tabla 11. *Censos de la población de Tabatinga. Fuente: IBGE & SEMA.*

Año (*)	Población total	Población en zona urbana	Población en zona rural	% Urbana	% Rural	Fuente
1991	27.923	19.822	8.101	71,0%	29,0%	IBGE (1991)
2000	37.919	26.638	11.281	70,3%	29,8%	IBGE (2000)
2010	52.272	36.355	15.917	69,5%	30,5%	IBGE (2010)
2018**	64.488	43.011	21.477	66,7%	33,3%	SEMA (2019)

* La información se ha obtenido de los censos conciliados y disponibles públicamente.
** Se selecciona este año y no uno más reciente para mantener consistencia en los cálculos de ambas ciudades.

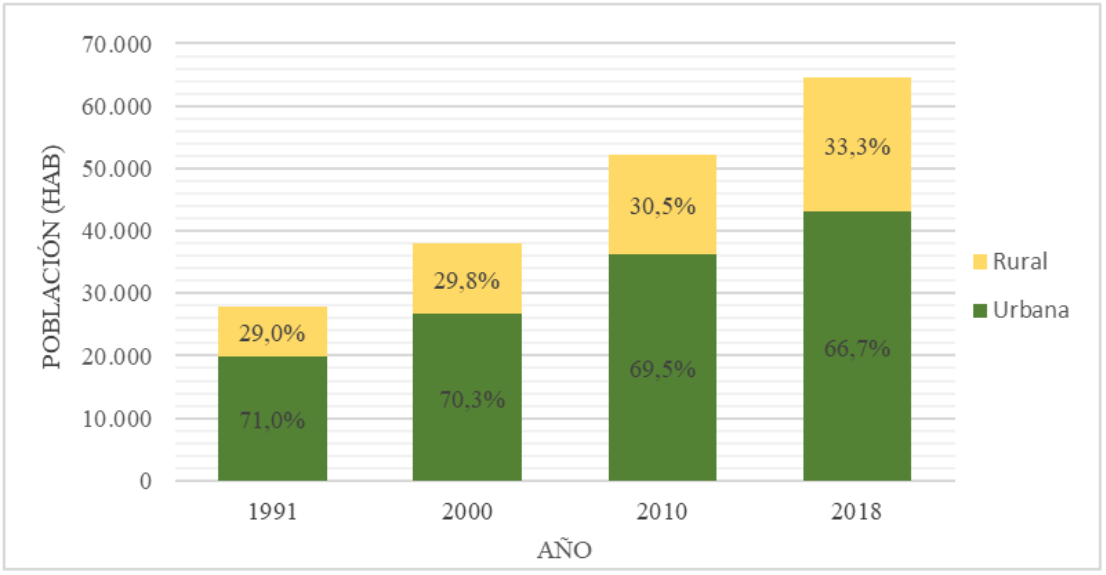


Figura 40. *Crecimiento poblacional en Tabatinga según los censos de 1991, 2000 y 2010. Fuente: IBGE & SEMA.*

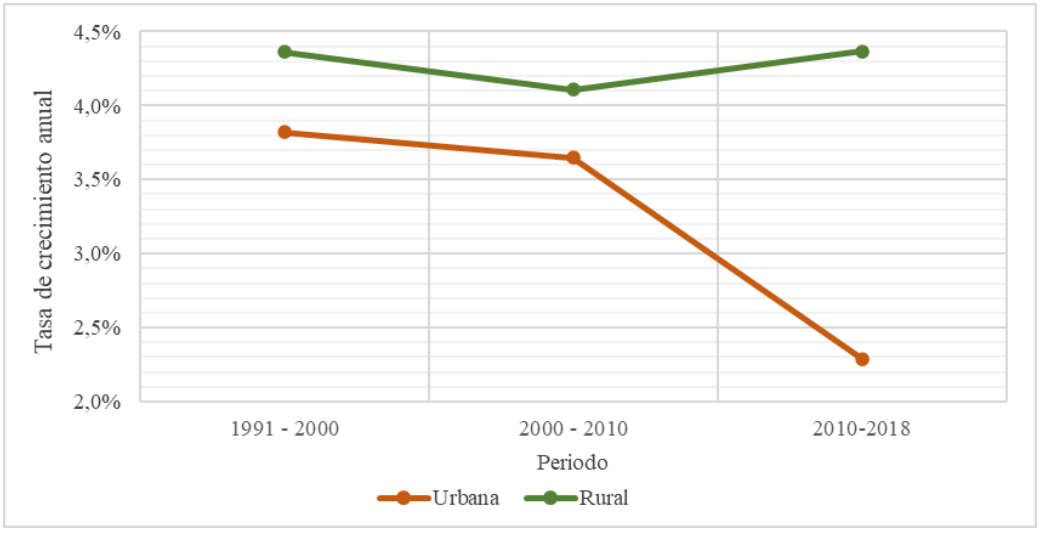


Figura 41. *Variación de la tasa de crecimiento anual de la población de Tabatinga. Fuente: IBGE & SEMA.*

7.4.3. Información histórica de suscriptores y consumos de agua

- **Leticia**

Los registros históricos de suscriptores y consumos se obtuvieron del Sistema Único de Información (SUI) desde el 2003 hasta el 2008. Las prestadoras del servicio más recientes: Empuamazonas y USPDL, no reportan esta información al SUI desde el 2008. Sin embargo, la USPDL suministró información de consumos y suscriptores al sistema de acueducto en el año 2022 mediante un adjunto en correo electrónico como respuesta a los radicados R-0783 del 5 de octubre de 2022 y al radicado R-5262 del 12 de octubre del 2022.

La información de suscriptores y consumos del sector residencial se clasifican por estrato socioeconómico debido a exigencias del MinAmbiente. Esta información se obtuvo del SUI desde el año 2003 hasta el 2008, y de la USPDL para el año 2022. En la dinámica de suscriptores (Figura 42) se observa un crecimiento entre el 2003 y el 2005 y luego una disminución en el 2006, para luego alcanzar el máximo de suscriptores en 2022 con 4.694 (Tabla 12 y Tabla 13).

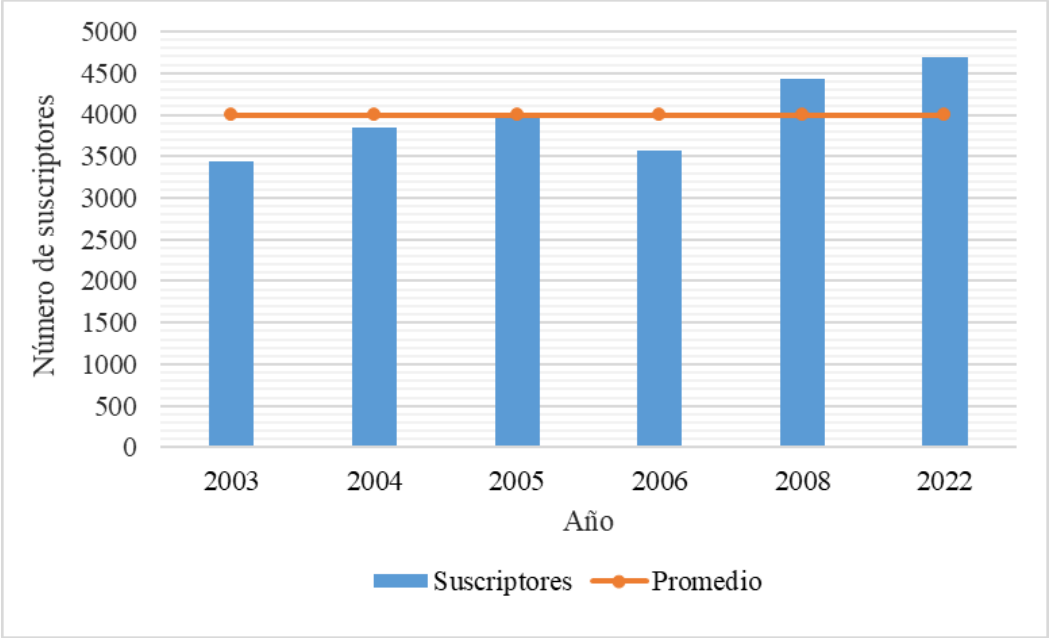


Figura 42. *Dinámica histórica de número de suscriptores al acueducto de Leticia. Fuente: SUI & USPDL.*

Tabla 12. *Suscriptores históricos del acueducto de Leticia por sector, en el periodo 2003-2022. Fuente: SUI & USPDL.*

Año	Suscriptores - Leticia											Fuente
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6	Industrial	Comercial	Oficial	Otros	Total	
2003	568	1.325	641	543	25	1	0	277	68	0	3.447	SUI (2003)
2004	913	1.459	614	441	10	0	0	337	78	0	3.850	SUI (2004)
2005	938	1.507	649	477	9	0	0	346	94	0	4.020	SUI (2005)
2006	940	1.336	556	387	6	0	0	254	90	0	3.569	SUI (2006)
2008	1.203	1.663	654	433	20	0	0	348	111	0	4.432	SUI (2008)
2022	1.434	1.366	1.179	35	0	0	0	522	158	0	4.694	USPDL (2022)

Tabla 13. *Suscriptores totales históricos al acueducto de Leticia en el periodo del 2003 al 2022. Fuente: SUI & USPDL.*

Año	Total Residencial – Leticia	Total No Residencial – Leticia	Total Suscriptores – Leticia	Fuente
2003	3.102	345	3.447	SUI (2003)
2004	3.436	414	3.850	SUI (2004)
2005	3.580	440	4.020	SUI (2005)
2006	3.225	344	3.569	SUI (2006)
2008	3.973	459	4.432	SUI (2008)
2022	4.014	680	4.694	USPDL (2022)

.

En la Figura 43 se evidencia un aumento de consumos, llegando a su máximo en 2008, con casi 900.000 m^3/año, pero decreciendo hasta 586.212 m^3/año en 2022 (Tabla 14). El consumo creció de forma constante hasta el 2008 pese a que el número de suscriptores se redujo considerablemente en 2006, esto indica que los suscriptores consumen más agua de la que consumían antes; pero en algún momento luego del 2008, los consumos comenzaron a descender pese a que los usuarios aumentaron. Los consumos totales se muestran en la Tabla 15.

Con base en la información recolectada, la realidad actual es que en los últimos años el sistema de acueducto ha presentado muchas deficiencias en los aspectos técnicos y administrativos, lo que ha llevado a la desconexión de muchos suscriptores y a la adopción de otras alternativas de abastecimiento de agua que, en la gran mayoría de los casos, corresponde a pozos de agua subterránea.

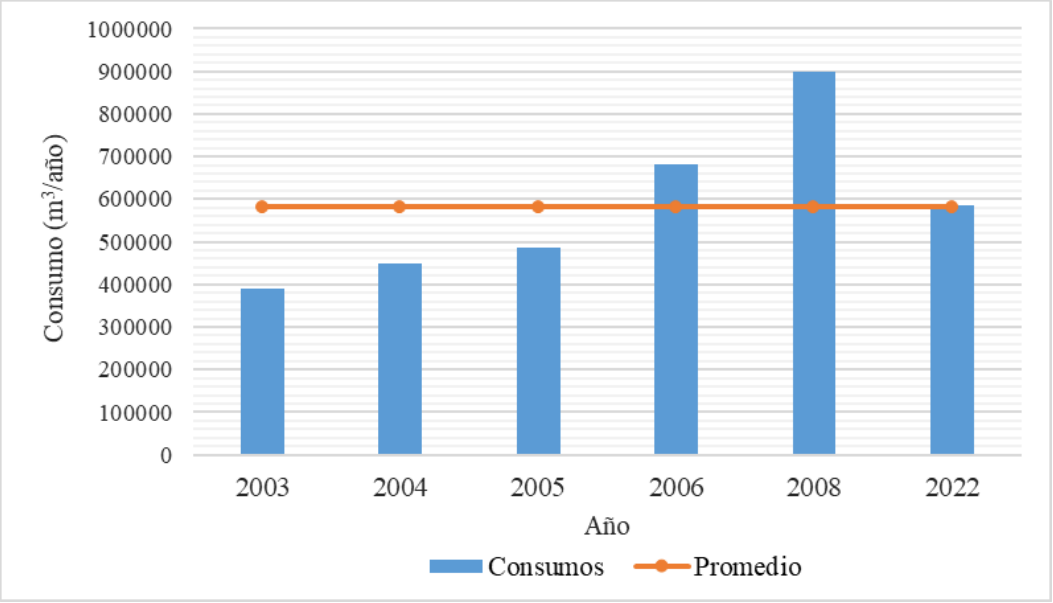


Figura 43. *Dinámica histórica de consumos de agua del acueducto municipal de Leticia. Fuente: SUI & USPDL.*

Tabla 14. *Consumos históricos del acueducto de Leticia por sector en el periodo 2003 -2022 en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL.*

Año	Consumos - Leticia (m^3/año)											Fuente
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6	Industrial	Comercial	Oficial	Otros	Total	
2003	48.156	139.179	73.226	53.197	2.266	0	0	15.216	60.075	0	391.315	SUI (2003)
2004	75.250	143.119	58.283	32.868	636	0	0	17.309	120.463	0	447.928	SUI (2004)
2005	83.394	142.912	59.877	32.891	1.096	0	0	24.867	141.145	0	486.182	SUI (2005)
2006	179.970	195.580	76.130	40.416	1.078	0	0	26.748	162.400	0	682.322	SUI (2006)
2008	278.470	308.520	112.933	49.934	1.829	0	0	21.506	128.138	0	901.330	SUI (2008)
2022	238.992	172.212	103.296	2.472	0	0	0	42.252	26.952	0	586.176	USPDL (2022)

Tabla 15. *Consumos totales históricos de agua en el acueducto de Leticia del 2003 al 2022 en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL.*

Año	Total Residencial – Leticia	Total No Residencial – Leticia	Total Consumos – Leticia	Fuente
2003	316.024	75.291	391.315	SUI (2003)
2004	310.156	137.772	447.928	SUI (2004)
2005	320.170	166.012	486.182	SUI (2005)
2006	493.174	189.148	682.322	SUI (2006)
2008	751.685	149.645	901.330	SUI (2008)
2022	517.008	69.204	586.176	USPDL (2022)

La distribución de suscriptores por sectores se presenta en la Figura 44 y Figura 45. El sector residencial ha representado, en promedio, casi el 90% del total de suscriptores del sistema. El restante 10% está dividido entre los sectores oficial y comercial, mientras que el sector industrial no reporta suscriptores.

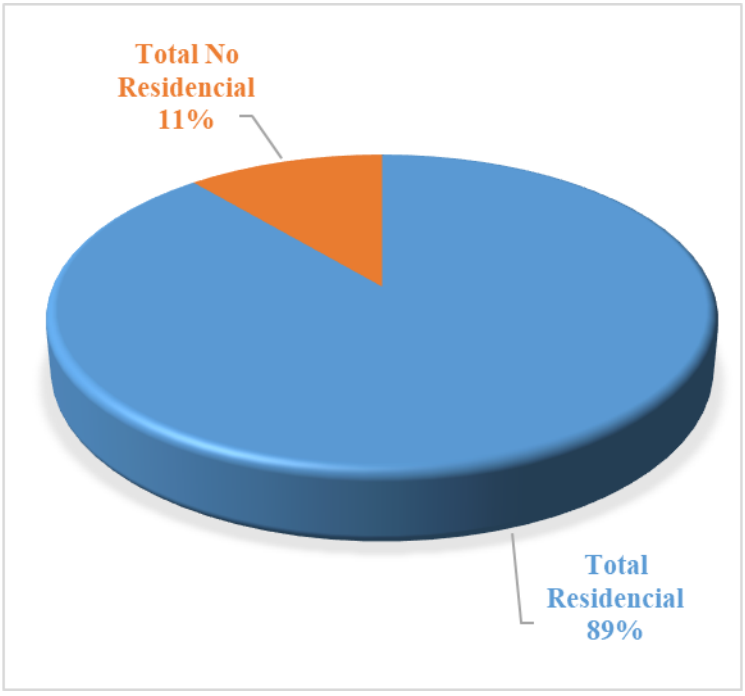


Figura 44. *Suscriptores al acueducto de Leticia. Fuente: SUI & USPDL.*

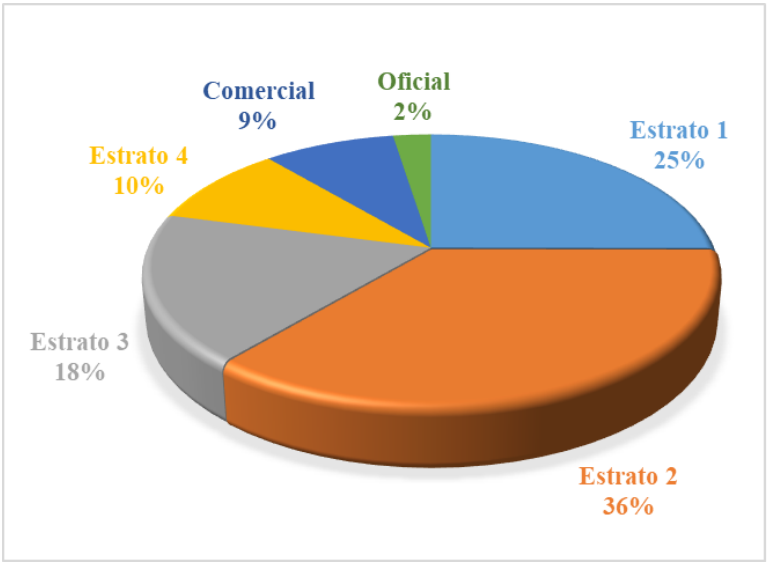


Figura 45. *Distribución de suscriptores al acueducto de Leticia. Fuente: SUI & USPDL.*

La distribución de consumo por sectores se presenta en la Figura 46 y Figura 47. El sector residencial representa el mayor consumo con un 77%, seguido del sector oficial con un 18% (pese a que solo representa el 2,5% de los suscriptores) y, por último, el sector comercial con un 9% del consumo.

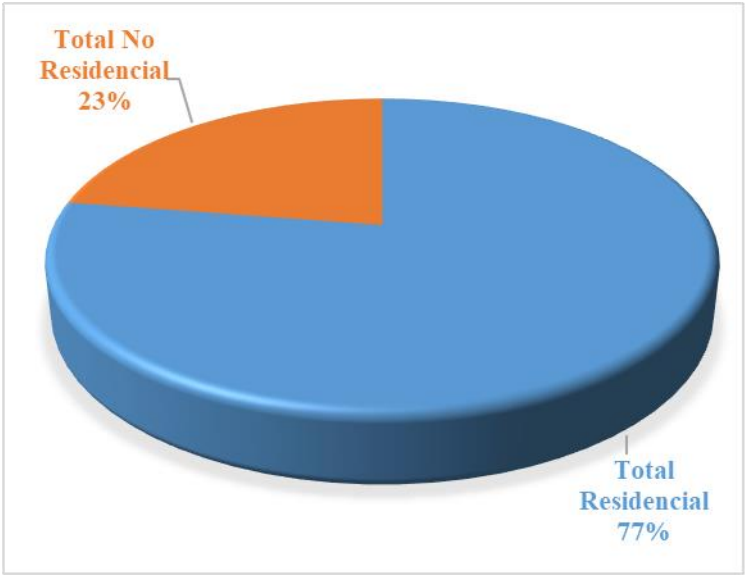


Figura 46. *Consumos de agua del acueducto de Leticia en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL.*

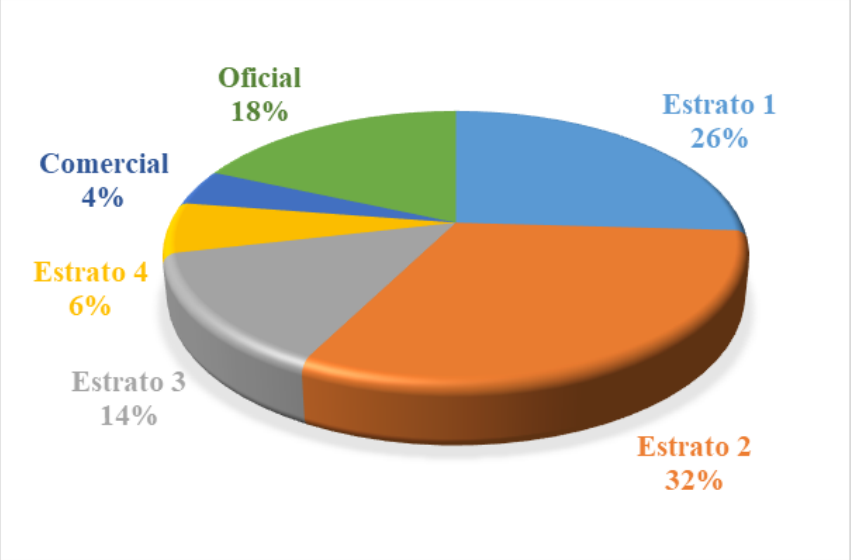


Figura 47. *Distribución de consumos de agua del acueducto de Leticia en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL.*

- **Tabatinga**

La información de los suscriptores al acueducto de Tabatinga se obtuvo del *Plano Municipal de Saneamento do Município de Tabatinga* (PMSB) del año 2018 (Prefeitura de Tabatinga, 2018), en donde se tienen los suscriptores totales y suscriptores por sector residencial y no residencial para el año 2017. Debido a que los consumos están disponibles para el año 2008, se utilizaron los datos de proyecciones de población total del IBGE en Tabatinga para calcular los suscriptores de ese mismo año (2008). Finalmente, la información sobre los consumos y suscriptores para el año 2022 se obtiene de COSAMA (2022). (ver **Anexo_09_Demanda**).

En la dinámica de suscriptores (Figura 48) se observa un crecimiento en el número de suscriptores, pasando de 5.952 en 2008 a 7.182 en el 2017 (Tabla 16).

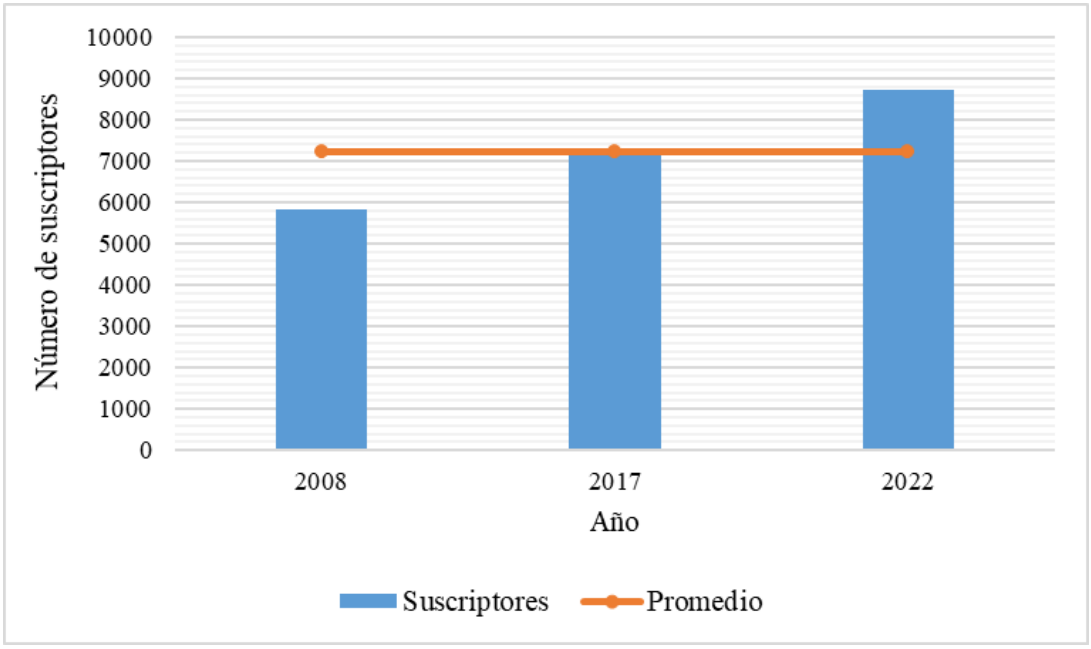


Figura 48. *Dinámica histórica de número de suscriptores al acueducto de Tabatinga entre el 2008 y 2022. Fuente: Prefeitura de Tabatinga & COSAMA.*

Tabla 16. *Suscriptores totales históricos al acueducto de Tabatinga entre el 2008 y el 2022. Fuente: Prefeitura de Tabatinga & COSAMA.*

Año	Total Residencial – Tabatinga	Total No Residencial – Tabatinga	Total Suscriptores – Tabatinga
2008	5.767	185	5.952
2017	6.959	223	7.182
2022	8.255	464	8.719

Para los consumos, se recurrió a la información de la *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico* del IBGE, en donde se tiene el volumen total de agua tratada distribuida para el 2008 y para el 2017, con la cual se logró calcular el consumo por sector residencial y no residencial. Igualmente, para el año 2022, se tiene el consumo reportado por COSAMA (2022).

Se observa en la dinámica del consumo (Figura 49) que este disminuyó en casi 100.000 m^3/año entre el 2008 y el 2022 (Tabla 17). Esto se puede dar porque la población ha comenzado a utilizar el acueducto cada vez menos debido a las grandes deficiencias en la prestación del servicio y optan por soluciones individuales.

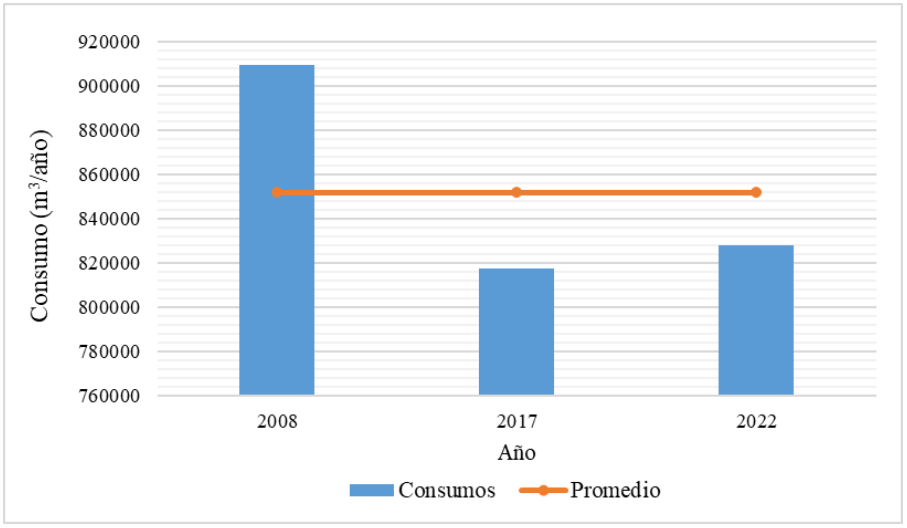


Figura 49. *Dinámica histórica de consumos de agua del acueducto municipal de Tabatinga. Fuente: IBGE & COSAMA.*

Tabla 17. *Consumos totales históricos de agua en el acueducto de Tabatinga entre el 2008 y 2022 en m³/año. Fuente: IBGE & COSAMA.*

Año	Total Residencial (m³/año) – Tabatinga	Total No Residencial (m³/año) – Tabatinga	Total Consumos Facturados (m³/año) – Tabatinga	Fuente
2008	859.535	49.996	909.531	IBGE (2008)
2017	790.528	26.977	817.505	IBGE (2017)
2022	783.936	44.064	828.000	COSAMA (2022)

En cuanto a la distribución de consumos, se tiene que el 95% es residencial y el restante 5% es no residencial.

7.5. Comportamiento sectorial de consumos de agua

7.5.1. Sector residencial

- **Leticia**

En cuanto a los suscriptores, ya se mencionó que crecen hasta el 2005, decrecen en el 2006 y llegan al máximo en el 2022, mientras que los consumos tienen un aumento sostenido entre 2003 y 2008, pero disminuye considerablemente para 2022 (Tabla 18, Tabla 19 y Figura 50).

Tabla 18. *Suscriptores del acueducto de Leticia entre el 2003 y el 2022 para el sector residencial. Fuente: SUI & USPDL.*

Año	Suscriptores sector residencial – Leticia						Total Residencial	Fuente
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6		
2003	568	1.325	641	543	25	1	3.102	SUI (2003)
2004	913	1.459	614	441	10	0	3.436	SUI (2004)

Año	Suscriptores sector residencial – Leticia						Total Residencial	Fuente
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6		
2005	938	1.507	649	477	9	0	3.580	SUI (2005)
2006	940	1.336	556	387	6	0	3.225	SUI (2006)
2008	1.203	1.663	654	433	20	0	3.973	SUI (2008)
2022	1.434	1.366	1.179	35	0	0	4.014	USPDL (2022)

Tabla 19. *Consumos de agua del acueducto de Leticia entre el 2003 y el 2022 para el sector residencial en m^3/año. Fuente: SUI & USPDL.*

Año	Consumos sector residencial (m^3/año) – Leticia						Total Residencial	Fuente
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6		
2003	48.156	139.179	73.226	53.197	2.266	0	316.024	SUI (2003)
2004	75.250	143.119	58.283	32.868	636	0	310.156	SUI (2004)
2005	83.394	142.912	59.877	32.891	1.096	0	320.170	SUI (2005)
2006	179.970	195.580	76.130	40.416	1.078	0	493.174	SUI (2006)
2008	278.470	308.520	112.933	49.934	1.829	0	751.685	SUI (2008)
2022	238.992	172.212	103.296	2.472	0	0	516.972	USPDL (2022)

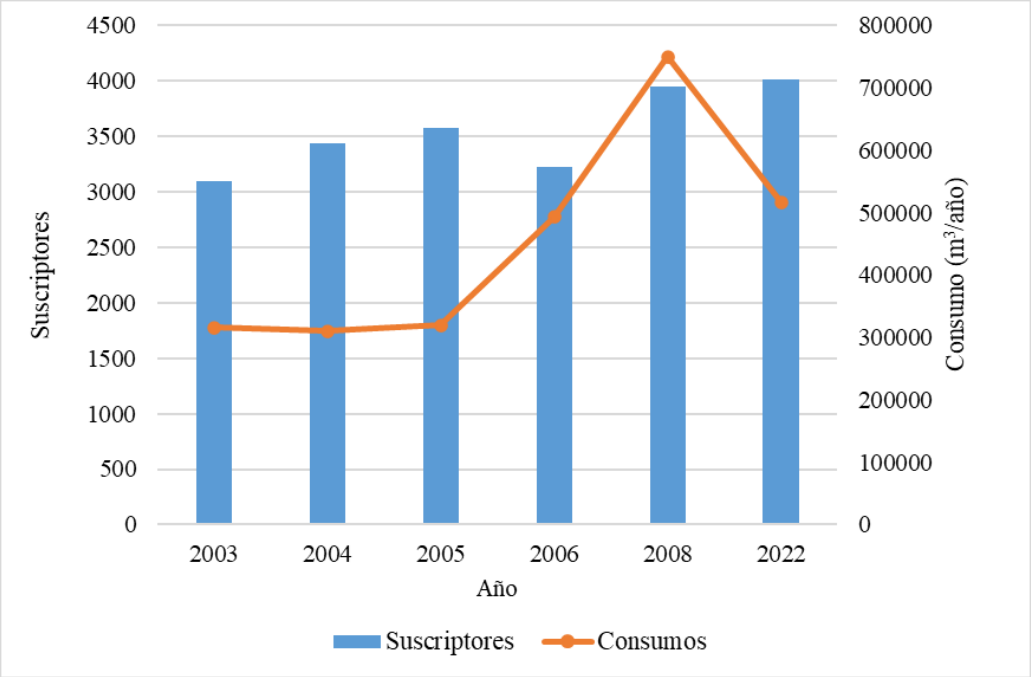


Figura 50. *Dinámica de consumo de agua del acueducto de Leticia para el sector residencial. Fuente: SUI & USPDL.*

- **Tabatinga**

La dinámica de suscriptores y consumos de Tabatinga (Tabla 20 y Figura 51) muestra que, como ya se explicó, hubo un aumento de aproximadamente 3.000 suscriptores, al tiempo que los consumos se redujeron significativamente alrededor de 100.000 m^3/año entre el 2008 y el 2022.

Tabla 20. *Consumos de agua y suscriptores al acueducto de Tabatinga para el sector residencial entre el 2008 y el 2022. Fuente: IBGE & COSAMA.*

Año	Suscriptores sector residencial – Tabatinga	Consumos sector residencial (m^3/año) – Tabatinga	Fuente
2008	5.767	858.878	IBGE (2008)
2017	6.959	769.866	IBGE (2017)
2022	8.255	783.936	COSAMA (2022)

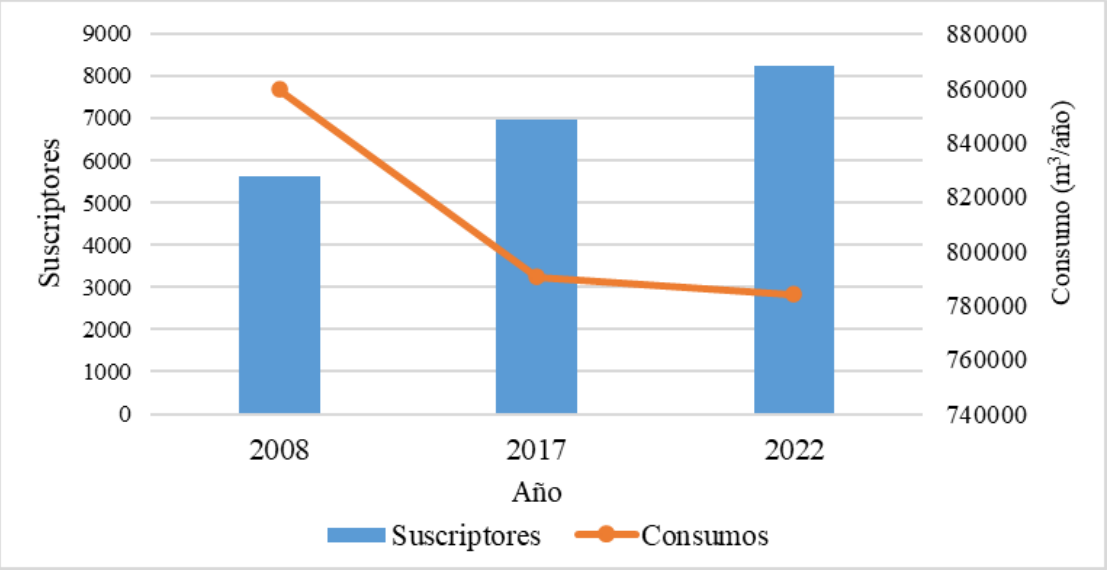


Figura 51. *Dinámica de consumo de agua del acueducto de Tabatinga para el sector residencial. Fuente: IBGE & COSAMA.*

7.5.2. Sector no residencial

- **Leticia**

El sector no residencial en Leticia está conformado por el sector oficial, comercial, e industrial. El sector industrial no presenta consumos ni suscriptores en el periodo de análisis. La dinámica de este sector (Tabla 21 y Figura 52) muestra un aumento sostenido del consumo hasta el 2006 y luego una disminución hasta el 2022 de 120.000 m^3/año. Por otro lado, los suscriptores tienden a aumentar, pues pasaron de 345 en el 2003 a 680 en 2022, casi el doble.

Tabla 21. *Consumos de agua y suscriptores al acueducto de Leticia para el sector no residencial entre el 2003 y el 2022. Fuente: SUI & USPDL.*

Año	Suscriptores sector no residencial – Tabatinga	Consumos sector no residencial (m^3/año) – Tabatinga	Fuente
2003	345	75.291	SUI (2003)
2004	414	137.772	SUI (2004)
2005	440	166.012	SUI (2005)
2006	344	189.148	SUI (2006)
2008	459	149.645	SUI (2008)
2022	680	69.204	USPDL (2022)

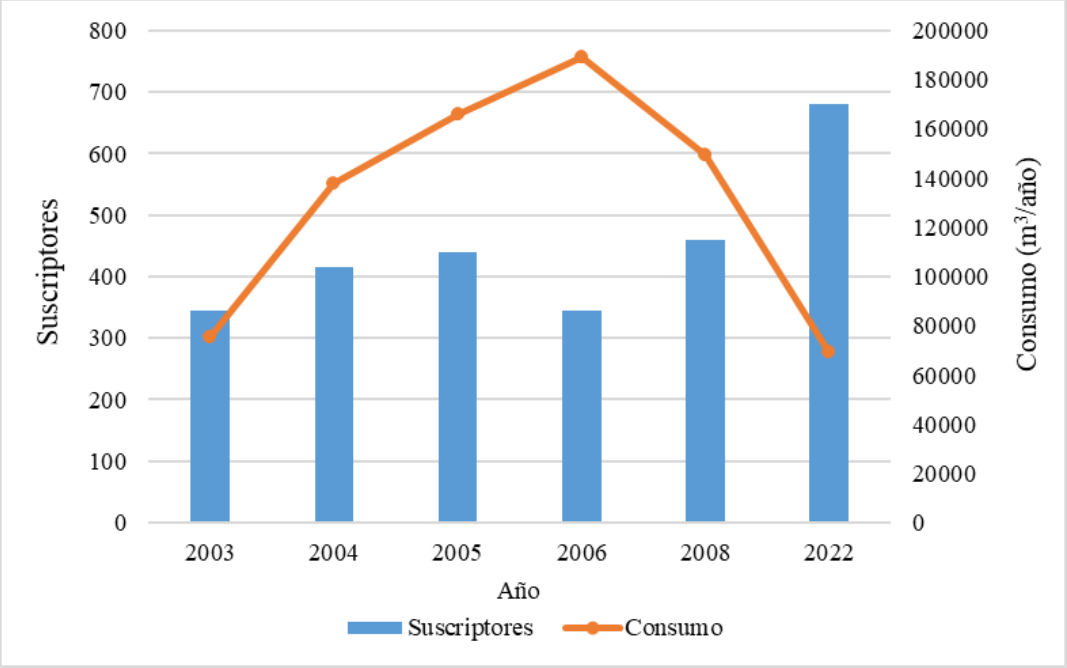


Figura 52. *Dinámica de consumos de agua y suscriptores al acueducto de Leticia para el sector no residencial entre el 2003 y el 2022. Fuente: SUI & USPDL.*

- **Tabatinga**

La dinámica de suscriptores y consumos de agua de este sector (Tabla 22 y Figura 53) presenta el mismo comportamiento que el sector residencial, pues disminuyen los consumos entre el 2008 y el 2022; sin embargo, los suscriptores aumentan en el mismo periodo.

Tabla 22. *Consumos de agua y suscriptores al acueducto de Tabatinga para el sector no residencial en el 2008 y el 2022. Fuente: IBGE & COSAMA.*

Año	Suscriptores sector no residencial – Tabatinga	Consumos sector no residencial (m^3/año) – Tabatinga	Fuente
2008	185	50.653	IBGE (2008)
2017	223	47.639	IBGE (2017)
2022	464	16.083	COSAMA (2022)

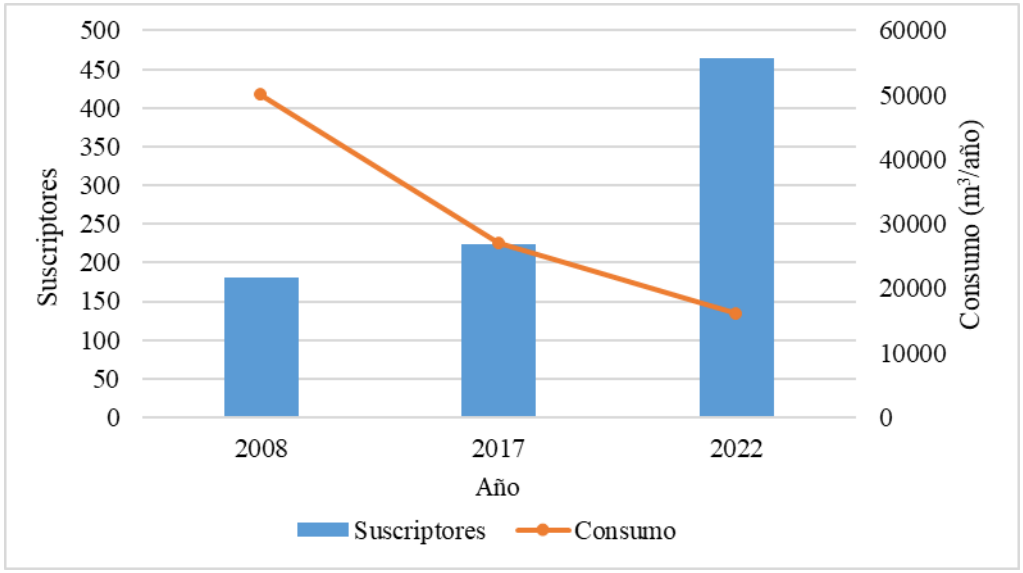


Figura 53. *Dinámica de consumos de agua y suscriptores al acueducto de Tabatinga para el sector no residencial en el 2008 y el 2022. Fuente: IBGE & COSAMA.*

7.6. Demanda hídrica futura

Se estima a partir de las proyecciones de la población y de la dotación de agua, y se define como la suma de las demandas de agua calculadas por cada sector (residencial y no residencial). El cálculo se hace únicamente con el sector residencial y su población servida, y la de los demás usos se estima como un porcentaje de la demanda residencial (**Anexo_00_InformesAntecedentes**).

De esta forma, para este estudio, se determina la demanda hídrica futura a partir de proyecciones de la demanda del sector residencial, y el uso no residencial se considera como porcentajes de los consumos de dicho sector con base en la información disponible de consumos de agua.

7.6.1. Demanda hídrica futura residencial

Este análisis se desarrolla mediante 3 escenarios que contemplan como variables la población proyectada, la dotación neta de agua potable y las pérdidas. Estos escenarios se muestran en la Tabla 23. Se pueden encontrar explicaciones más detalladas de los escenarios empleados, en el informe de la metodología (**Anexo_00_InformesAntecedentes**).

Tabla 23. *Escenarios considerados para el cálculo de la demanda futura de agua. Fuente: OTCA & SHI S.A.S. (2023).*

Escenario	Nombre	Descripción	Población	Dotación	Pérdidas
1	Pesimista	Incremento de la demanda de agua en la población	Aumenta	Se incrementa hasta 135 l/hab/día	Se mantiene en la última reportada
2	Optimista	Disminución de la demanda de agua en la población	Estable	Se reduce hasta 100 l/hab/día	Se reduce hasta el 25% en 2044
3	Tendencial	Conforme a la situación observada en los datos históricos de la demanda de agua	Estable	Se mantiene en 135 l/hab/día	Se reduce hasta el 30% en 2030

7.6.2. Demanda hídrica futura total

Primero, se requiere calcular la demanda hídrica de los otros usos diferentes a la residencial, ese cálculo se define como un porcentaje de la demanda hídrica residencial, como ya se mencionó anteriormente.

Para Leticia, el sector no residencial está dividido en los sectores oficial y comercial, que representan el 21% y el 4% del consumo de agua anual respectivamente, mientras que, para Tabatinga, el sector no residencial representa el 6% de los consumos anuales del acueducto.

De esta forma, la demanda hídrica total es la suma de todos estos sectores juntos. El procedimiento de cálculo se encuentra explicado en el informe de metodología (**Anexo_00_InformesAntecedentes**).

7.6.3. Demanda hídrica futura subterránea

Se calcula como un porcentaje de la demanda hídrica total, definido con base en la demanda actual de aguas subterráneas y de los escenarios de proyección. Estos escenarios tienen consideraciones similares a los escenarios de proyección para la demanda futura total, y se encuentran descritos en la Tabla 24.

Tabla 24. *Escenarios considerados para el cálculo de la demanda futura de agua subterránea. Fuente: OTCA & SHI S.A.S. (2023).*

Escenario	Nombre	Descripción	Consumo	Método de cálculo demanda subterránea actual
1	Pesimista	Incremento del consumo de agua subterránea	Aumenta	A partir de usuarios y dotación máxima
2	Optimista	Disminución del consumo de agua subterránea	Disminuye	A partir de las extracciones 2008 – 2022

Escenario	Nombre	Descripción	Consumo	Método de cálculo demanda subterránea actual
3	Tendencial	Conforme a la situación observada en los datos	Igual al crecimiento poblacional	Extracciones promedio por punto en 2022

El análisis de demanda hídrica subterránea se realizó para la población total y para los consumos totales sin diferenciar uso, dado que la información con la que se cuenta no es lo suficientemente detallada para alcanzar análisis específicos por usos. La descripción detallada de los escenarios y del cálculo de la demanda actual se encuentran en el informe de la metodología (**Anexo_00_InformesAntecedentes**).

7.7. Resultados

7.7.1. Población actual y futura

- **Leticia**

Al proyectar la población de Leticia hasta el 2044 con base en los censos del DANE hasta el 2018, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25. *Población total proyectada de Leticia al 2044. Fuente: OTCA & SHI S.A.S (2023).*

Población de Leticia en 2044 (con datos de 1973 a 2018)					
Método	Aritmético	Geométrico	Exponencial	Wappaus	UNAL
Población Total (hab)	60.510	99.802	71.655	83.801	61.330

Se observa que todos los métodos tienen resultados diferentes, siendo los métodos geométrico y Wappaus los de las proyecciones con mayores poblaciones, mientras que el aritmético y UNAL son los menores. Para evaluar la validez de las proyecciones, se consideraron las proyecciones de población del DANE al año 2022 (DANE, 2018b), cuya tendencia se muestra en la Figura 54 y se comparó con la población obtenida para el año 2022 por los diversos métodos en la Tabla 26.

De esta tabla se observa que los métodos aritmético y UNAL son los más cercanos y los métodos geométrico y Wappaus se encuentran alejados de las proyecciones del DANE y, siendo el método exponencial el que tiene los resultados más alejados.

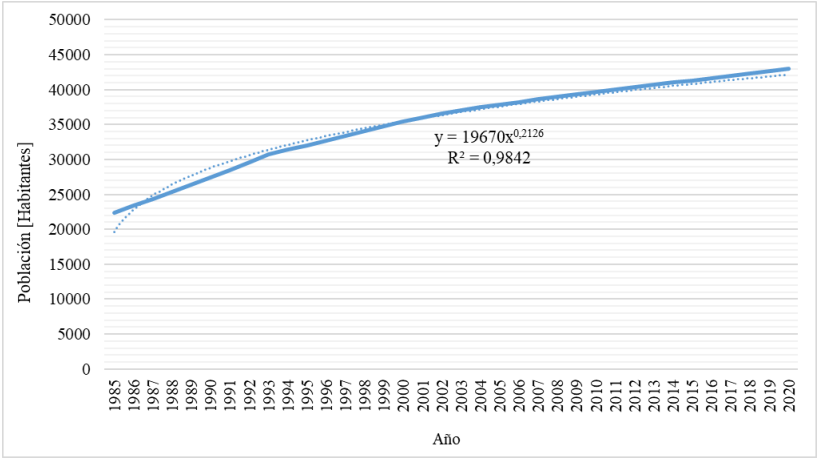


Figura 54. *Crecimiento poblacional a 2022 en Leticia según proyecciones del DANE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Tabla 26. *Población total de Leticia proyectada a 2022 por diversos métodos, comparados con los datos del DANE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Población de Leticia en 2022 (con datos de 1973 a 2018)						
Método	Aritmético	Geométrico	Exponencial	Wappaus	UNAL	DANE
Población Total (hab)	45.562	48.782	36.627	49.259	47.322	43.572

La ecuación de ajuste de las proyecciones del DANE se muestra en la ecuación 1. A partir de esta, se proyecta la población hasta 2044, y se compara con las demás, también al año 2044 (Tabla 27).

En la Figura 55 se presentan los resultados de las proyecciones utilizando cada uno de los diferentes métodos.

$$P_f = 19670 * (T_f - 1985)^{0,2201} \quad (1)$$

Tabla 27. *Población proyectada a 2044 en Leticia usando diversos métodos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Método	**Población a 2044 en Leticia (hab)**		
	Total	**Urbana**	**Rural**
Aritmético	60.510	45.853	14.657
Geométrico	99.802	77.942	21.860
Exponencial	71.655	56.159	15.496
Wappaus	83.801	66.515	17.286
UNAL	61.330	49.041	12.289
Tendencia DANE	48.258	--	--

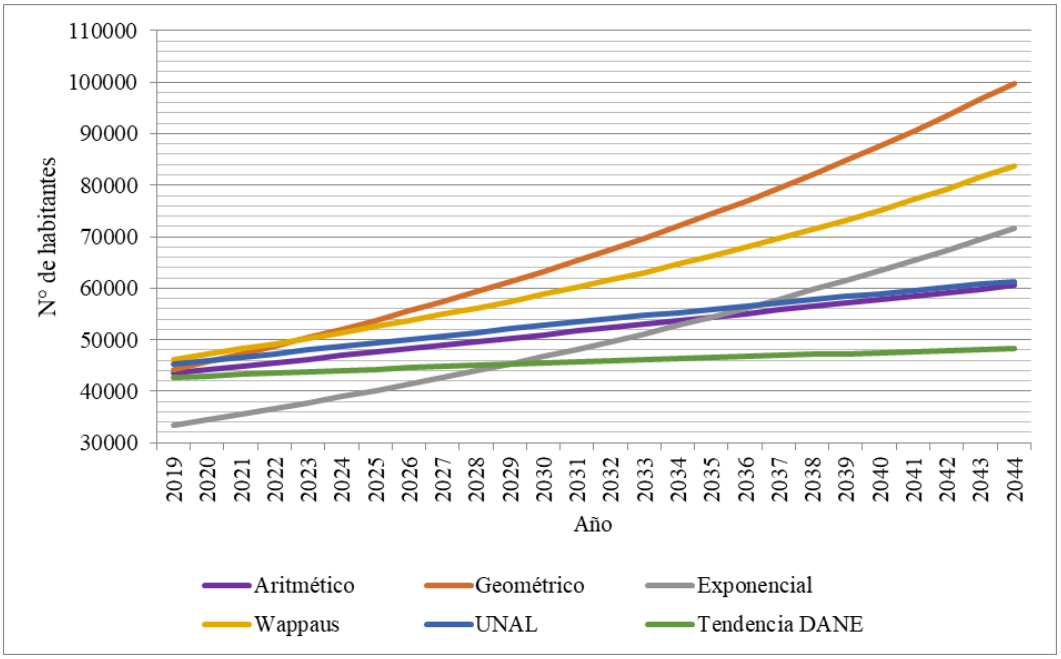


Figura 55. *Resultado de las diferentes proyecciones de la población hasta el año 2044 en Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

En la Figura 55 se observa que la tendencia de las proyecciones del DANE en comparación con los otros métodos es de crecimiento desacelerado y estable, caso contrario a los métodos geométrico, exponencial y Wappaus, que tienen tendencias mucho más crecientes y su aplicación está definida para zonas con un amplio desarrollo económico futuro y con áreas amplias de expansión, caso contrario a la zona de estudio. Las proyecciones de los métodos aritmético y UNAL son muy parecidas y su aplicación está definida para zonas con características propias de la región, sin embargo, presentan un crecimiento más acelerado del que se ha presentado en la zona en los últimos años. Se tiene entonces que la distribución geométrica, exponencial y Wappaus exageran la población, y el método UNAL y Aritmético son muy similares y no se aplican bien a la región. Por tanto, la tendencia DANE es la proyección que mejor se ajusta a la zona de estudio y la que se emplea para concluir en los resultados de esta estimación.

- **Tabatinga**

Al proyectar la población de Tabatinga hasta el 2044 con base en la información de población del IBGE hasta el 2018, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28. *Población total proyectada de Tabatinga al 2044. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Población de Tabatinga en 2044 (con datos de 1991 a 2018)					
Método	Aritmético	Geométrico	Exponencial	Wappaus	IBGE
Población Total (hab)	96.447	147.698	143.392	186.395	86.001

Se observa un comportamiento muy similar al de Leticia, en el que los métodos geométricos, exponencial y Wappaus resultan en las mayores poblaciones, mientras que el aritmético en las menores. Para comparar y verificar las proyecciones, se recurre a unas estimativas de la población total de Tabatinga hechas por el IBGE para 2010, 2016, 2018, 2020, 2030 y 2040 (SEMA, 2019), a partir de las cuales se calculó la tendencia hasta el 2044. La línea de tendencia se muestra en la Figura 56 y se compara con la población obtenida para el año 2022 por los diversos métodos en la Tabla 29.

De esta comparación se observa que los métodos geométrico y Wappaus se encuentran más alejados de las proyecciones del IBGE y el aritmético el más cercano. Se presenta además el método exponencial como el que tiene unos resultados intermedios.

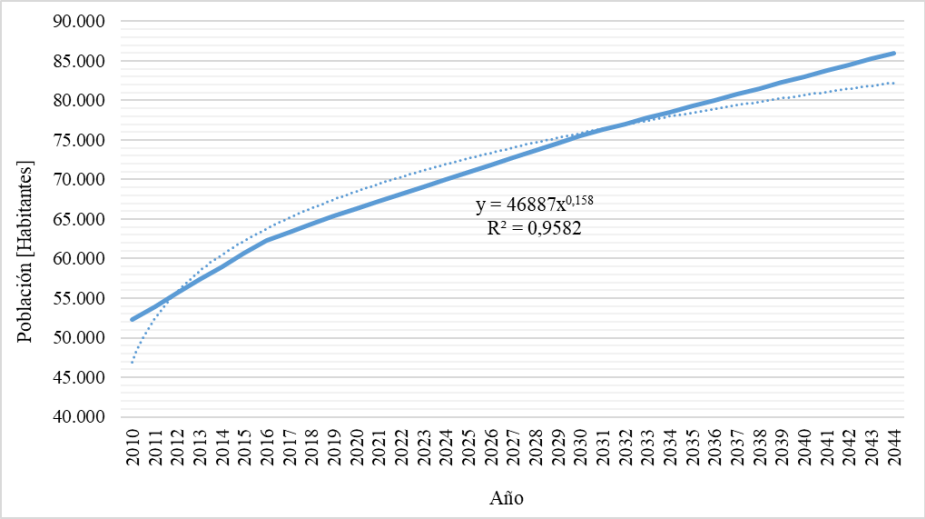


Figura 56. *Crecimiento poblacional a 2022 en Tabatinga según algunas estimativas del IBGE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Tabla 29. *Población total de Tabatinga proyectada a 2022 por diversos métodos, comparados con estimativas del IBGE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Población de Tabatinga en 2022 (con datos de 1991 a 2018)					
Método	Aritmético	Geométrico	Exponencial	Wappaus	IBGE
Población Total	68.335	76.163	73.808	77.309	68.207

Partiendo de las estimativas del IBGE a 2044, se comparan los resultados de los demás métodos en la Tabla 30 y en la Figura 57 se presentan los resultados de las proyecciones utilizando cada uno de los diferentes métodos.

Tabla 30. *Población proyectada a 2044 en Tabatinga usando diversos métodos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Método	Población a 2044 en Tabatinga (hab)		
	Total	Urbana	Rural
Aritmético	97.785	65.519	32.266
Geométrico	152.448	98.212	54.236
Exponencial	148.017	93.258	54.758
Wappaus	198.041	106.332	91.709
Tendencia IBGE	86.001	53.348	20.256

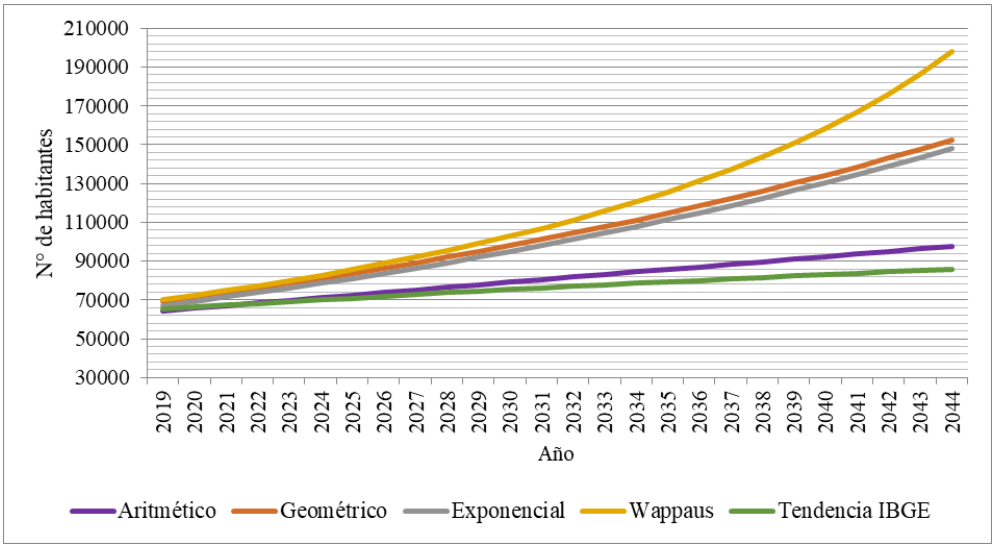


Figura 57. *Comparación entre las proyecciones de la población total de Tabatinga por cada método. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

En la Figura 57 se observa que la tendencia de los datos del IBGE en comparación con los otros métodos muestra un crecimiento más desacelerado y estable, caso contrario a los métodos geométrico, exponencial y Wappaus, que tienen tendencias exponenciales y llegan casi hasta los 200.000 habitantes para 2044.

Por el contrario, las proyecciones del método aritmético son muy parecidas a la tendencia marcada por las proyecciones del IBGE, y su aplicación de este método está definida para zonas con características propias de la región; sin embargo, la proyección del IBGE resulta en una mejor aproximación a la población en 2044. Por tanto, y buscando ser lo más conservadores posibles, para la estimación de la demanda hídrica se utilizarán las proyecciones obtenidas a partir de las tendencias del IBGE.

7.7.2. Dotación de agua actual

Los resultados de la dotación actual se presentan en la Tabla 31 y Tabla 32. El periodo actual se considera como el periodo de datos disponibles, que es del 2003 al 2022 para Leticia, y 2008 al 2022 para Tabatinga. El cálculo detallado se encuentra en el informe de metodología (**Anexo_00_InformesAntecedentes**).

Tabla 31. *Dotaciones neta y bruta para el sector residencial de Leticia entre el 2003 y el 2022. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Año	Dotación neta residencial Leticia (l/hab/día)						
	Estrato 1	**Estrato 2**	**Estrato 3**	**Estrato 4**	**Estrato 5**	**Estrato 6**	**Total**
2003	57	70	76	65	62	0	330
2004	55	66	63	50	45	0	279
2005	59	63	62	46	84	0	314
2006	128	98	92	70	118	0	506
2008	155	124	115	77	61	0	532
2022	111	84	59	47	0	0	301
Año	**Dotación bruta residencial Leticia (l/hab/día)**						
	Estrato 1	**Estrato 2**	**Estrato 3**	**Estrato 4**	**Estrato 5**	**Estrato 6**	**Total**
2003	167	206	225	192	181	0	971
2004	162	193	187	146	132	0	820
2005	175	186	181	135	246	0	923
2006	376	288	269	205	346	0	1484
2008	455	365	339	227	180	0	1566
2022	406	307	214	172	0	0	1099

Tabla 32. *Dotaciones neta y bruta para el sector residencial de Tabatinga entre el 2008 y el 2022. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Año	2008	2017	2022
Dotación neta residencial Tabatinga (l/hab/día)	81	60	50
Dotación bruta residencial Tabatinga (l/hab/día)	389	290	243

Para el caso de Leticia, el comportamiento de la dotación neta (Figura 58) muestra una progresión creciente hasta el 2008 pero decreciente hasta el 2022. El estrato 4 y el estrato 5 presentan las menores dotaciones, siendo incluso cero para el estrato 5 en 2022, debido a que no hay suscriptores. Las mayores dotaciones se presentan en el estrato 1 y 2, alcanzando su máximo en el 2008 pero disminuyendo para 2022.

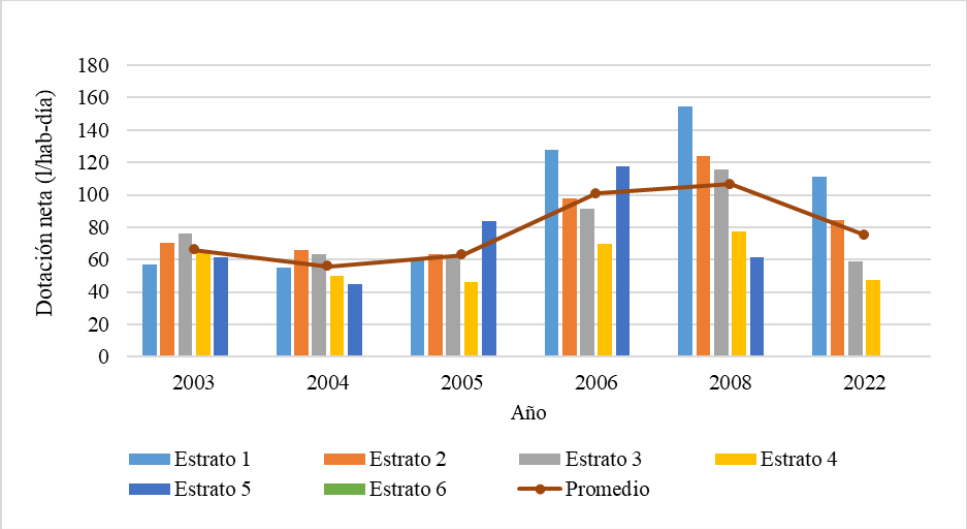


Figura 58. *Dotación neta del sector residencial para Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Para el caso de Tabatinga, se observa que las dotaciones disminuyeron progresivamente entre el 2008 y el 2022, pasando de 81 a 50 l/hab/día (Figura 59). Estos valores tan bajos pueden deberse a que la población prefiere abastecerse por medio de pozos de agua subterránea individuales.

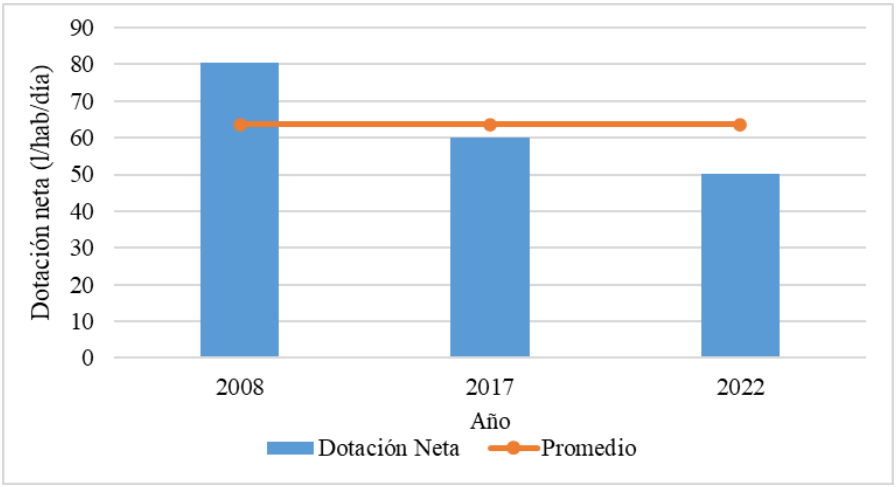


Figura 59. *Dotación neta del sector residencial para Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

7.7.3. Demanda hídrica futura total

A partir de lo anterior, y bajo los escenarios definidos, se presenta el resumen de la demanda hídrica total futura para la región de la Tabla 33 a la Tabla 37 y en la Figura 60 y Figura 61.

De todos los métodos de proyección utilizados tanto en Leticia como en Tabatinga, se considera que los métodos que utilizan las estimaciones del DANE (en Leticia) y el IBGE (en Tabatinga) son los que presentan los resultados más coherentes con la realidad de la región y que no presentan

proyecciones exageradas, por lo que son estos resultados los que se usaron para los cálculos de la demanda subterránea. La demanda total de ambas ciudades calculada con las tendencias IBGE y DANE se presenta en la Tabla 38.

Adicionalmente, y comparando los resultados de los tres escenarios de análisis, se concluye que el escenario que mejor se ajusta a la zona de estudio es el escenario 3 – tendencial, debido a que el pesimista resulta en demandas muy exageradas para poblaciones mucho mayores, y el optimista tiene en cuenta la aplicación de políticas de reducción de consumos que pueden ser muy complejas de implementar. El escenario tendencial presenta las mismas dinámicas de los otros escenarios sin exagerar la reducción o aumento de la demanda.

Se observa que, si bien la tendencia de la población es al crecimiento, la demanda hídrica tiende al decrecimiento, esto debido a que, como ya se ha mencionado, las personas han optado por construir pozos de agua subterránea para suplir sus necesidades de agua, pues el servicio de abastecimiento de ambas ciudades es insuficiente.

Tabla 33. *Demanda hídrica total en Leticia bajo los 3 escenarios de análisis utilizando el método aritmético. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Demanda hídrica total en Leticia - Método Aritmético (m^3/año)							
	Año	**2022**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2044**
Escenario 1 – Pesimista	**Residencial**	4.949.319	5.590.115	6.737.926	7.985.507	9.332.860	10.482.578
	Oficial	1.039.357	1.173.924	1.414.964	1.676.957	1.959.901	2.201.341
	Comercial	197.973	223.605	269.517	319.420	373.314	419.303
	Total	6.186.649	6.987.644	8.422.407	9.981.884	1.1666.075	13.103.223
Escenario 2 – Optimista	**Residencial**	4.817.864	5.474.000	4.386.765	3.767.411	3.350.039	3.102.833
	Oficial	1.011.751	1.149.540	921.221	791.156	703.508	651.595
	Comercial	192.715	218.960	175.471	150.696	134.002	124.113
	Total	6.022.330	6.842.500	5.483.456	4.709.263	4.187.548	3.878.541
Escenario 3 – Tendencial	**Residencial**	4.949.319	5.325.255	5.094.699	4.628.176	4.272.046	4.000.416
	Oficial	1.039.357	1.118.303	1.069.887	971.917	897.130	840.087
	Comercial	197.973	213.010	203.788	185.127	170.882	160.017
	Total	6.186.649	6.656.568	6.368.374	5.785.220	5.340.057	5.000.520

Tabla 34. *Demanda hídrica total en Leticia bajo los 3 escenarios de análisis utilizando el método UNAL. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Demanda hídrica total en Leticia - Método UNAL (m^3/año)							
	Año	**2022**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2044**
Escenario 1 – Pesimista	**Residencial**	1.849.270	1.981.863	2.207.157	2.437.407	2.672.150	2.862.891
	Oficial	388.347	416.191	463.503	511.855	561.152	601.207
	Comercial	73.971	79.275	88.286	97.496	106.886	114.516
	Total	2.311.587	2.477.328	2.758.946	3.046.758	3.340.188	3.578.614
Escenario 2 – Optimista	**Residencial**	1.849.270	1.476.792	1.134.353	968.638	854.873	786.217
	Oficial	388.347	310.126	238.214	203.414	179.523	165.106
	Comercial	73.971	59.072	45.374	38.746	34.195	31.449
	Total	2.311.587	1.845.990	1.417.942	1.210.797	1.068.591	982.772
Escenario 3 – Tendencial	**Residencial**	1.849.270	1.930.961	1.596.293	1.381.150	1.229.916	1.137.207
	Oficial	388.347	405.502	335.222	290.042	258.282	238.814
	Comercial	73.971	77.238	63.852	55.246	49.197	45.488
	Total	2.311.587	2.413.702	1.995.367	1.726.438	1.537.395	1.421.509

Tabla 35. *Demanda hídrica total en Leticia bajo los 3 escenarios de análisis utilizando las proyecciones de la población del DANE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Demanda hídrica total en Leticia – Tendencia DANE (m^3/año)							
	Año	**2022**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2044**
Escenario 1 – Pesimista	**Residencial**	4.730.522	5.202.694	6.006.917	6.831.090	7.673.634	8.360.004
	Oficial	993.410	1.092.566	1.261.452	1.434.529	1.611.463	1.755.601
	Comercial	189.221	208.108	240.277	273.244	306.945	334.400
	Total	5.913.152	6.503.368	7.508.646	8.538.862	9.592.043	10.450.005
Escenario 2 – Optimista	**Residencial**	4.730.522	4.819.376	3.696.709	3.046.323	2.603.644	2.339.065
	Oficial	993.410	1.012.069	776.309	639.728	546.765	491.204
	Comercial	189.221	192.775	147.868	121.853	104.146	93.563
	Total	5.913.152	6.024.220	4.620.886	3.807.904	3.254.555	2.923.831
Escenario 3 – Tendencial	**Residencial**	4730.522	4.956.190	4.541.967	3.959.108	3.512.548	3.190.389
	Oficial	993.410	1.040.800	953.813	831.413	737.635	669.982
	Comercial	189.221	198.248	181.679	158.364	140.502	127.616
	Total	5.913.152	6.195.237	5.677.458	4.948.885	4.390.685	3.987.986

Tabla 36. *Demanda hídrica total en Tabatinga bajo los 3 escenarios de análisis utilizando el método aritmético. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Demanda hídrica total en Tabatinga - Método Aritmético (m^3/año)									
Año	**Escenario 1 – Pesimista**			**Escenario 2 – Optimista**			**Escenario 3 – Tendencial**		
	Residencial	**No residencial**	**Total**	**Residencial**	**No residencial**	**Total**	**Residencial**	**No residencial**	**Total**
2022	6.052.152	363.129	6.415.281	6.052.152	363.129	6.415.281	6.052.152	363.129	6.415.281
2025	7.609.479	456.569	8.066.048	9.630.057	577.803	10.207.860	4.836.931	290.216	5.127.147
2030	10.501.462	630.088	11.131.550	7.469.135	448.148	7.917.283	3.751.555	225.093	3.976.648
2035	13.763.991	825.839	14.589.831	6.279.967	376.798	6.656.765	3.154.267	189.256	3.343.523
2040	17.397.067	1.043.824	18.440.891	5.527.394	331.644	5.859.038	2.776.269	166.576	2.942.845
2044	20.570.321	1.234.219	21.804.540	5.098.799	305.928	5.404.727	2.560.996	153.660	2.714.656

Tabla 37. *Demanda hídrica total en Tabatinga bajo los 3 escenarios de análisis utilizando la proyección del IBGE. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Demanda hídrica total en Tabatinga - Tendencia IBGE (m^3/año)									
Año	**Escenario 1 – Pesimista**			**Escenario 2 – Optimista**			**Escenario 3 – Tendencial**		
	Residencial	**No residencial**	**Total**	**Residencial**	**No residencial**	**Total**	**Residencial**	**No residencial**	**Total**
2022	6.040.791	362.447	6.403.238	6.040.791	362.447	6.403.238	6.040.791	362.447	6.403.238
2025	7.462.357	447.741	7.910.098	9.443.868	566.632	10.010.500	4.743.413	284.605	5.028.018
2030	10.034.282	602.057	10.636.339	7.136.854	428.211	7.565.065	3.584.659	215.080	3.799.738
2035	12.725.469	763.528	13.488.997	5.806.130	348.368	6.154.498	2.916.271	174.976	3.091.247
2040	15.623.739	937.424	16.561.164	4.963.973	297.838	5.261.811	2.493.276	149.597	2.642.873
2044	18.091.455	1.085.487	19.176.942	4.484.359	269.062	4.753.420	2.252.379	135.143	2.387.521

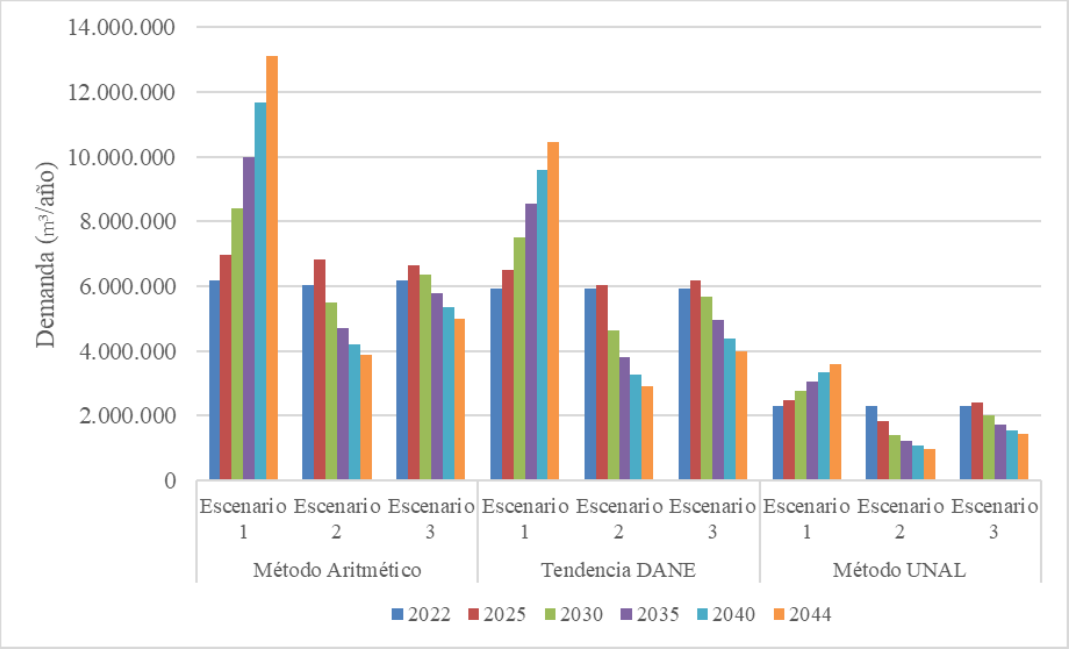


Figura 60. *Dinámica de la demanda hídrica total futura en Leticia proyectada usando los métodos aritmético y UNAL y con la tendencia DANE, bajo los 3 escenarios de análisis. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

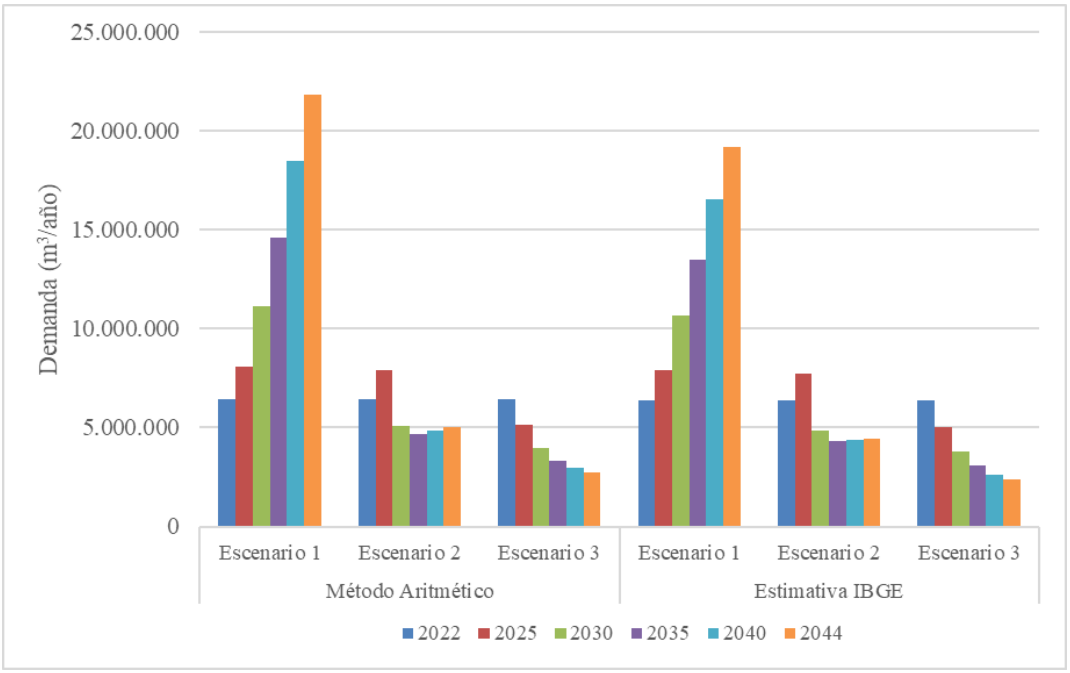


Figura 61. *Dinámica de la demanda hídrica total futura en Tabatinga proyectada usando el método aritmético y las estimativas del IBGE, bajo los 3 escenarios de análisis. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Tabla 38. *Demanda hídrica total futura en la región transfronteriza bajo los 3 escenarios de análisis. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Demanda hídrica TOTAL (m^3/año)			
Año	**Escenario 1 (pesimista)**	**Escenario 2 (optimista)**	**Escenario 3 (tendencial)**
2022	12.316.390	12.316.390	12.316.390
2025	14.413.466	13.759.222	11.223.255
2030	18.144.984	9.479.846	9.477.197
2035	22.027.859	8.112.322	8.040.132
2040	26.153.207	7.634.035	7.033.558
2044	29.626.948	7.360.357	6.375.507

7.7.4. Demanda hídrica actual subterránea

Para este cálculo, se determinó el caudal promedio de extracción por captación registrado en cada uno de los inventarios de pozos disponibles, así:

- De los pozos inventariados en 2008 (García-Romo, 2008), 771 se encuentran activos. De estos, se calcula una extracción de agua de 2.389 m^3/día (3,1 m^3/día por punto).

- De los pozos inventariados en 2015 (OTCA & SHI SAS, 2015; ANA, 2015c), 212 se encuentran activos. De estos, se calcula una extracción de agua de 325 m^3/día (1,4 m^3/día por punto).

- De los pozos inventariados en 2022 por SHI SAS (este estudio), 67 se encuentran activos. De estos, se calcula una extracción de agua de 247 m^3/día (3,5 m^3/día por punto).

Partiendo de las extracciones y de la cantidad de usuarios de aguas subterráneas, se calcula la demanda considerando 3 métodos: el primero empleando los datos del inventario más reciente de SHI SAS, 2022 (este estudio), el segundo utilizando los datos del 2008 (García-Romo, 2008), de 2015 (OTCA & SHI SAS, 2015; ANA, 2015c) y de 2022 (este estudio), y el tercero con la información de población y dotación. Los detalles de la forma del cálculo de estos métodos se encuentran en el informe de la metodología (**Anexo_00_InformesAntecedentes**). Los resultados se muestran en la Tabla 39.

Estos valores fueron usados luego en las consideraciones de los escenarios de proyección de la demanda subterránea futura, que son los mismos escenarios de la demanda total (pesimista, optimista, tendencial).

Tabla 39. *Demanda hídrica subterránea actual de agua en la región transfronteriza calculada a partir de los 3 métodos definidos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Método	Descripción	Demanda hídrica subterránea (m^3/día)	Demanda hídrica subterránea (m^3/año)
1	Extracciones 2022 (este estudio)	3.552	1.296.542
2	Extracciones 2008 – 2022	2.961	1.080.765
3	Usuarios – Dotación	5.162	1.884.130

7.7.5. Demanda hídrica subterránea futura

Esta se estimó con los 3 escenarios de proyección que se aplicaron en la proyección de la demanda total (Tabla 40), encontrando de nuevo que el que mejor se ajusta a la zona de estudio es el escenario tendencial (3). Con base en este análisis se estima que el agua subterránea actualmente está supliendo entre un 10% y un 15% de la demanda total de agua en la región. A partir de estos porcentajes y utilizando la proyección futura de la demanda total, se calculó la demanda hídrica subterránea futura (Tabla 41 y Figura 62).

A pesar hay aumento en la población de ambas ciudades a partir de todas las proyecciones empleadas, la tendencia resultante de la demanda de agua subterránea muestra una disminución. Esto debido a que, en este procedimiento de cálculo, a las proyecciones de la demanda total (que tiende a la disminución) se le extrae el porcentaje correspondiente a la demanda de agua subterránea, de modo que las proyecciones del agua subterránea siguen la misma tendencia de la demanda total, que es a la disminución. Este procedimiento se realiza así debido a que no se tienen datos históricos de la demanda. Esta disminución se da debido a que el escenario escogido para el análisis (tendencial) considera una reducción progresiva de los consumos de agua y de pérdidas en el sistema, lo que ocasiona una disminución de la demanda así se construyan más pozos. Para mejorar esta estimación, es necesario contar con registros históricos del caudal de agua subterránea extraído o de la demanda de este recurso.

Tabla 40. *Demanda hídrica total y subterránea actual (2022) considerando diversos escenarios y proyecciones. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Escenario	Demanda total (m^3/año)	Demanda Subterránea (m^3/año)	Subterránea / Total (%)
1 (Pesimista)	12.316.390	3.768.260	31
2 (Optimista)		2.161.530	18
3 (Tendencial)		2.593.084	21

Tabla 41. *Demanda futura de agua subterránea en la región transfronteriza. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Demanda hídrica futura en la región transfronteriza (m^3/año)						
Año	Escenario 1 – Pesimista		Escenario 2 – Optimista		Escenario 3 – Tendencial	
	Total	Subterránea	Total	Subterránea	Total	Subterránea
2022	12.316.390	3.768.260	12.316.390	2.161.530	12.316.390	2.593.084
2025	14.413.466	4.615.913	13.759.222	2.365.333	11.223.255	2.376.478
2030	18.144.984	6.248.012	9.479.846	1.588.850	9.477.197	2.014.242
2035	22.027.859	8.121.670	8.112.322	1.317.040	8.040.132	1.711.035

Demanda hídrica futura en la región transfronteriza (m^3/año)						
Año	Escenario 1 – Pesimista		Escenario 2 – Optimista		Escenario 3 – Tendencial	
	Total	Subterránea	Total	Subterránea	Total	Subterránea
2040	26.153.207	10.283.201	7.634.035	1.196.619	7.033.558	1.497.854
2044	29.626.948	12.231.436	7.360.357	1.121.285	6.375.507	**1.357.853**

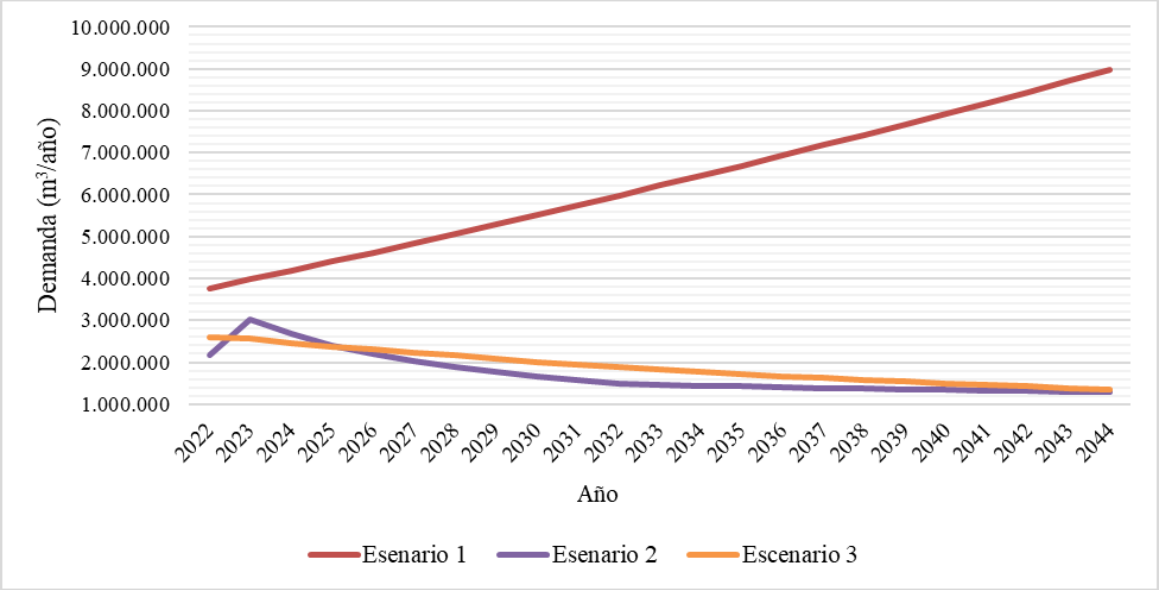


Figura 62. *Dinámica de la demanda hídrica futura subterránea total estimada para la región transfronteriza con diferentes escenarios de consumo de agua. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

8. INVENTARIO DE FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN, EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DEL PELIGRO (RIESGO) DE CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO.

El desarrollo de este capítulo se da como aporte al objetivo de identificar y mapear fuentes potenciales de contaminación, que permitan generar mapas de vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en toda el área.

Este capítulo comprende la revisión de información secundaria y la cartografía de las fuentes potenciales de contaminación, actividad ejecutada en campo durante el inventario de puntos de agua, así como la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, el peligro de contaminación y la definición de estrategias enfocadas en mitigar la contaminación del acuífero.

El proceso de la elaboración de un inventario de fuentes potenciales de contaminación consta de 3 fases principales: el diseño del inventario, la implementación del inventario y la evaluación y análisis de la información recopilada.

Para la identificación y caracterización de las fuentes o cargas contaminantes se toma como base la metodología POSH de la guía técnica de cargas contaminantes del Banco Mundial elaborada por Foster & Hirata (1988) y Foster et al., (2002), donde se hace una clasificación de fuentes potencialmente contaminantes en función de el origen de la actividad o del contaminante (Pollutant Origin) y la carga hidráulica asociada (Hydraulic Surcharge), inferida por la cantidad de agua utilizada o disponible.

Para determinar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de un acuífero, se aplican varios métodos paramétricos (GOD y DRASTIC), los cuales se fundamentan en el hecho de que algunos parámetros controlan la vulnerabilidad del agua subterránea; en general, estos se basan en la superposición de diferentes variables, como litología, suelo, espesor de la zona no saturada, entre otros; a cada clase de cada una de las variables se les asigna una puntuación cuantitativa con el objetivo de obtener un índice numérico de vulnerabilidad. Por su parte el peligro de contaminación del acuífero se evalúa mediante la elaboración de una matriz que relaciona cualitativamente la carga contaminante con la vulnerabilidad del acuífero, según la metodología propuesta en Foster et al., (2002).

Durante el reconocimiento de campo se realiza la verificación de los puntos identificados mediante información secundaria y se actualiza el inventario, incorporando fuentes potenciales de contaminación pasadas, actuales y futuras. El levantamiento de campo comenzó el 14/09/2022 y finalizó el 13/10/22. Este inventario es realizado por dos comisiones de profesionales ambientales, cada una acompañada por mano de obra no calificada de la zona, las cuales se encargan de recopilar información mediante entrevistas e inspecciones directa en los puntos contaminantes del área de estudio, de manera conjunta con la campaña de puntos de agua.

8.1. Inventario de las fuentes potenciales de contaminación.

La identificación de fuentes potenciales de contaminación parte en la información secundaria existente disponible de diversas autoridades, estudios previos, mapas e imágenes satelitales. Mediante esta información se identificó que en la región de Leticia predominan los puntos de vertimiento, seguidos por las estaciones de servicio y lugares de almacenamiento de hidrocarburos, los cuerpos de agua contaminados y los sitios de disposición de residuos sólidos; en menor proporción se encuentran las actividades industriales, las plantas de sacrificio, aeropuertos y cementerios (Figura 63 y Figura 64); en la región de Tabatinga las fuentes potencialmente contaminantes corresponden a estaciones de servicio y lugares de almacenamiento de hidrocarburos, actividades industriales, zonas de minería, plantas de sacrificio, lagunas de efluentes, cementerios y zonas de disposición de residuos sólidos (Figura 63 y Figura 64). Todas las fuentes potencialmente contaminantes, tanto de fuentes primarias como secundarias analizadas en este capítulo, fueron incluidas en la metodología POSH de fuentes de contaminación. Además, la Figura 67 muestra todas las fuentes potencialmente contaminantes, tanto de fuentes primarias y secundarias, reunidas en un único diagrama.

La ciudad de Leticia no posee zonas agrícolas extensas, actividades mineras, ni una gran cantidad de industrias que puedan afectar la calidad del agua subterránea. Además, de acuerdo con Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos -RESPEL, solo se encontró a la empresa ORIGEN S.A.S. como generadora de este tipo de residuos. Por su parte, al norte de la ciudad de Tabatinga, se observa una zona de extracción de material para la fabricación de ladrillos.

En Leticia, las fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea, identificadas y verificadas durante la campaña de campo corresponden a vertimientos (17) y cuerpos de agua contaminados (6); en menor proporción se encuentran lagunas de efluentes, zonas de disposición de residuos sólidos, cementerios, estaciones de servicio y zonas de manejo de hidrocarburos, pozos sépticos, pozos abandonados y planta de sacrificio.

En Tabatinga se observa una situación similar a Leticia, donde la principal fuente potencial de contaminación del agua subterránea corresponde a puntos de vertimiento de aguas residuales domésticas (10); seguido por zonas de disposición de residuos sólidos y cementerios. La localización se presenta la Figura 65, la distribución porcentual en la Figura 66 y el inventario de los puntos caracterizados en campo se presenta en la Tabla 42 y Tabla 43. La Figura 73 muestra el número total de focos de contaminación contabilizados en los dos municipios. Además, el inventario de fuentes de contaminación se compila en el **Anexo_04_FuentesdeContaminacion**

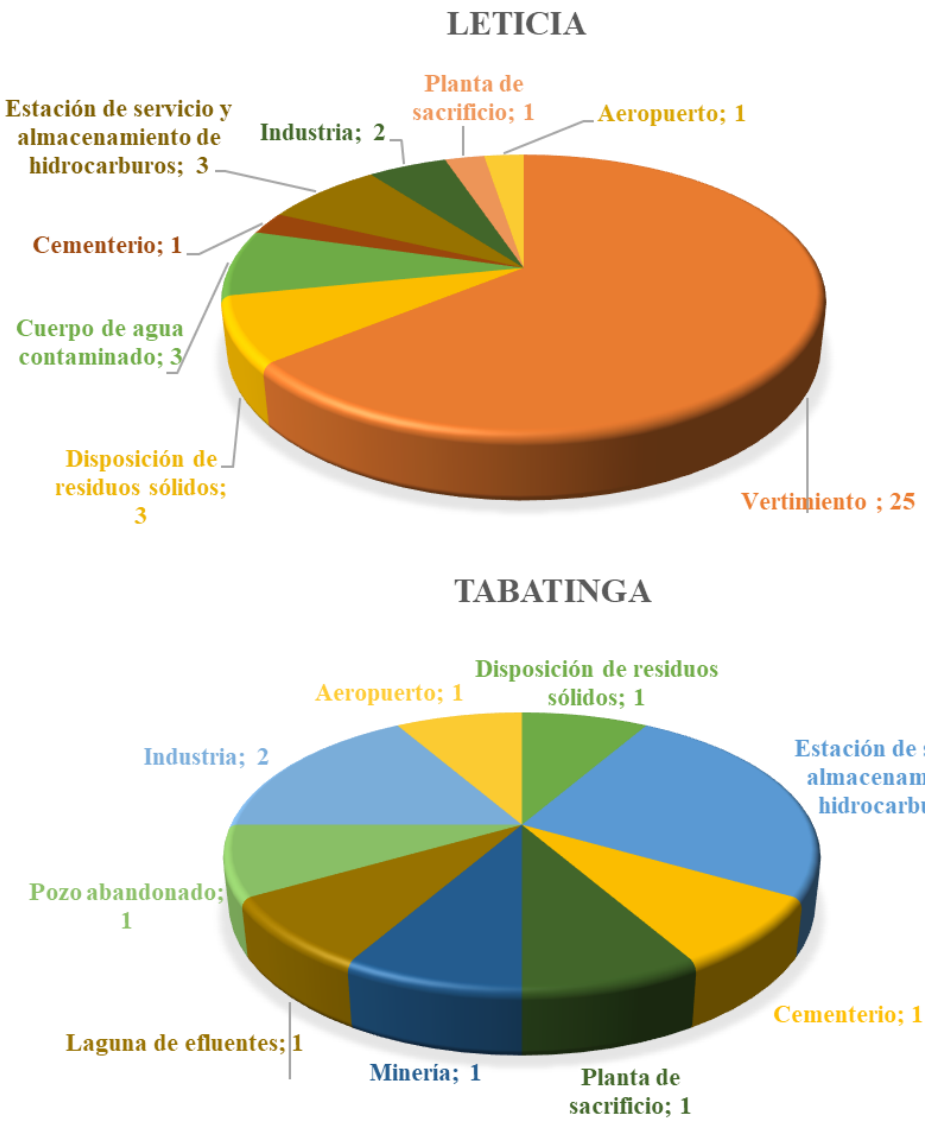


Figura 63. *Distribución porcentual de las fuentes potenciales de contaminantes del agua subterránea* ***identificadas a partir de información secundaria*** *en los municipios de Leticia y Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

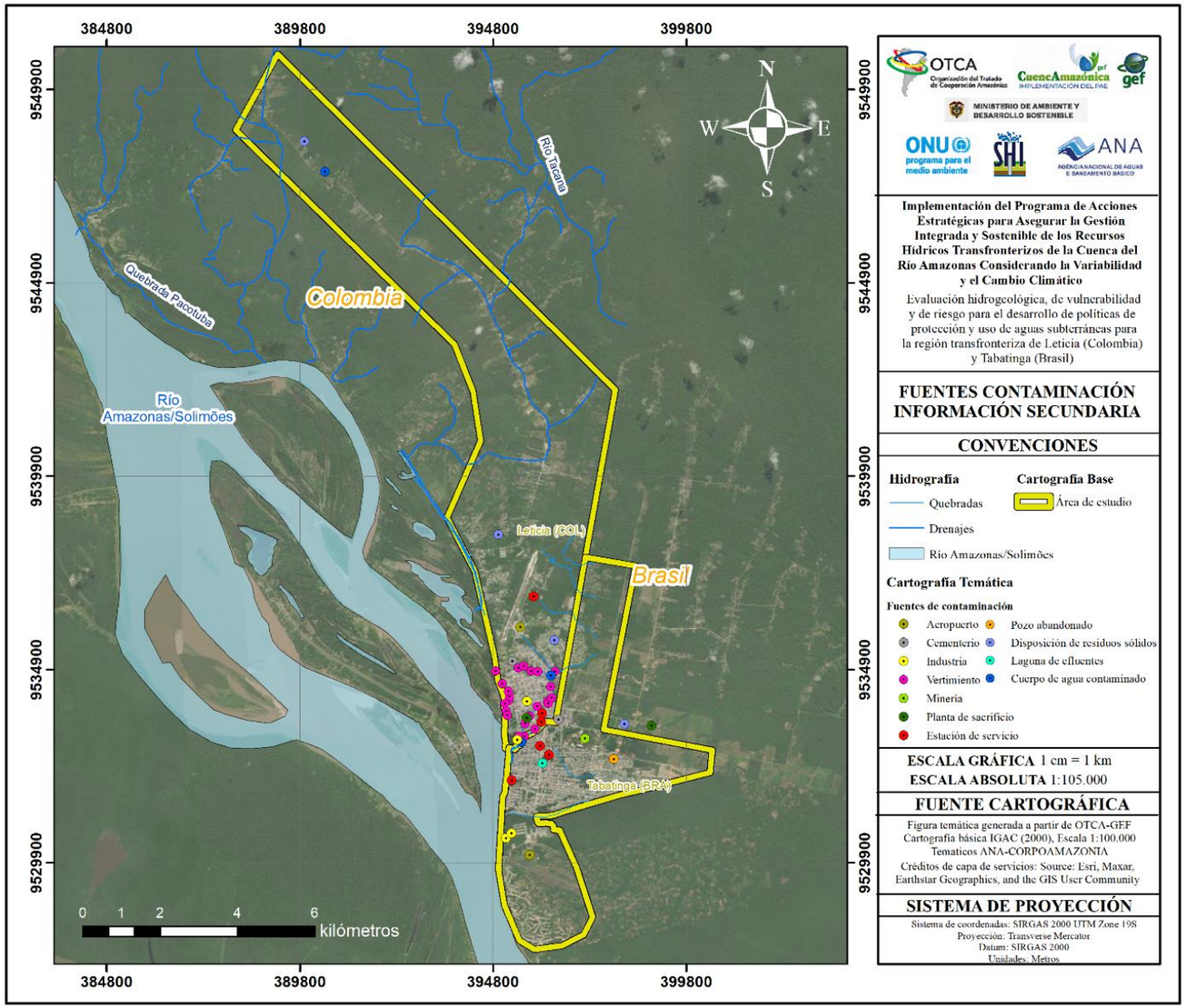


Figura 64. *Localización de las fuentes potencialmente contaminantes identificadas a partir de información secundaria. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

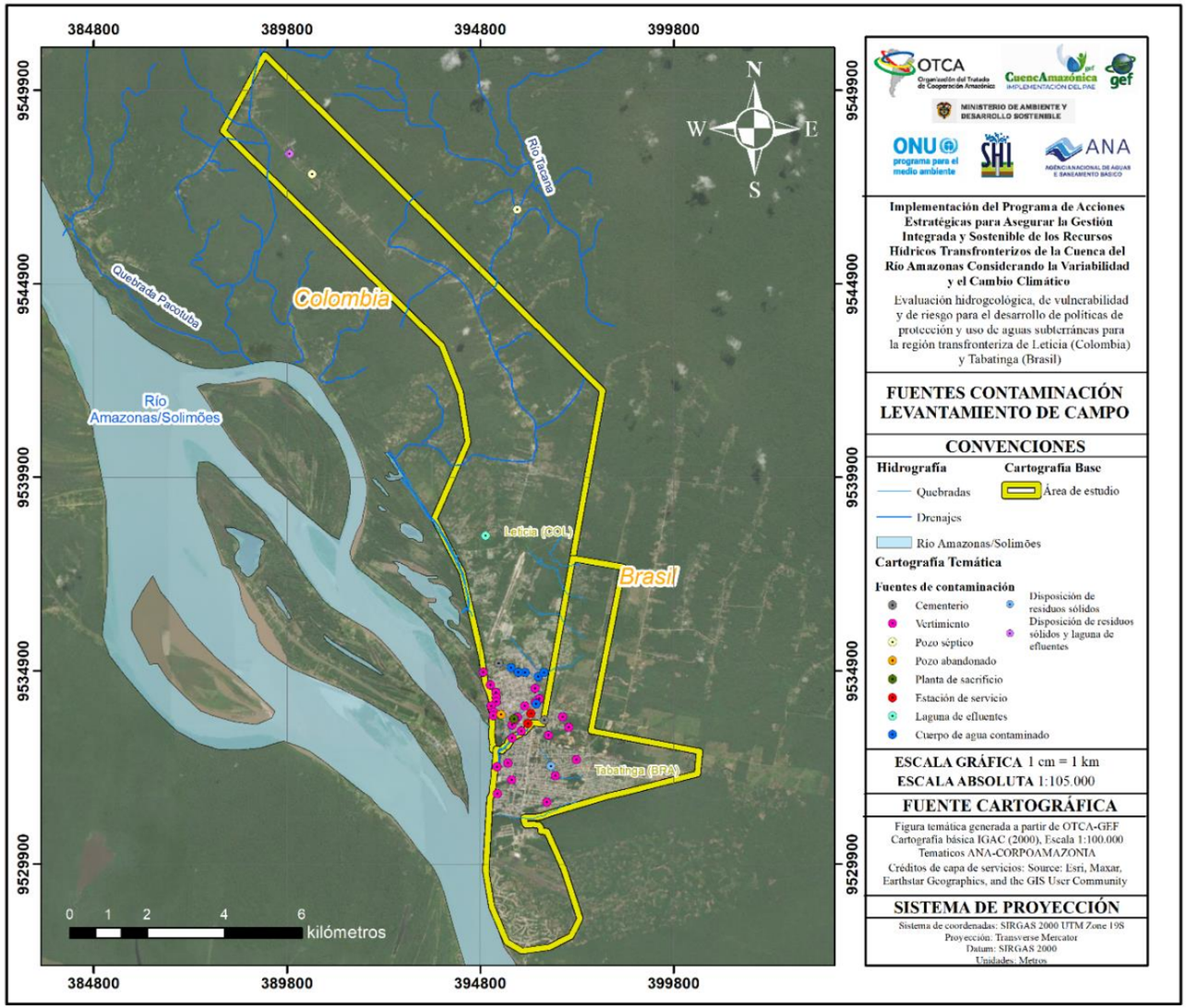


Figura 65. *Localización de las fuentes potencialmente contaminantes identificadas durante el reconocimiento de campo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2028-2022).*

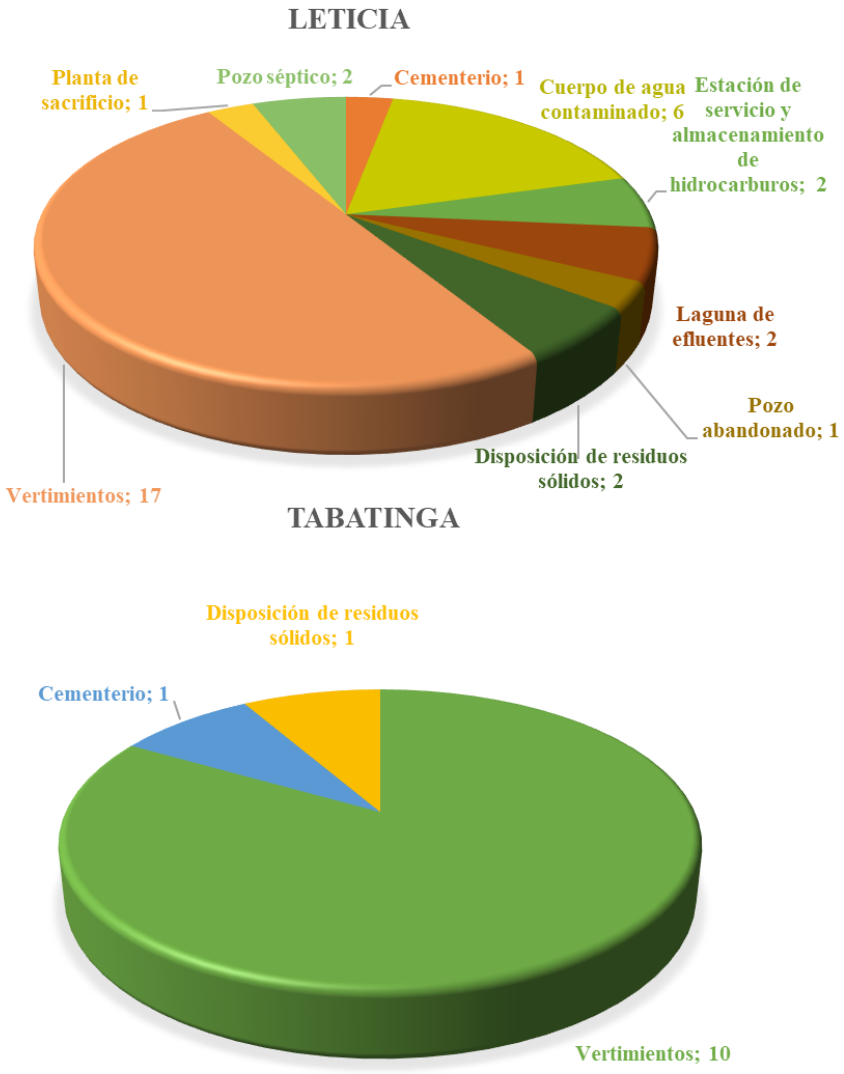


Figura 66. *Distribución porcentual de las fuentes potencialmente contaminantes identificadas* ***durante el reconocimiento de campo****. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

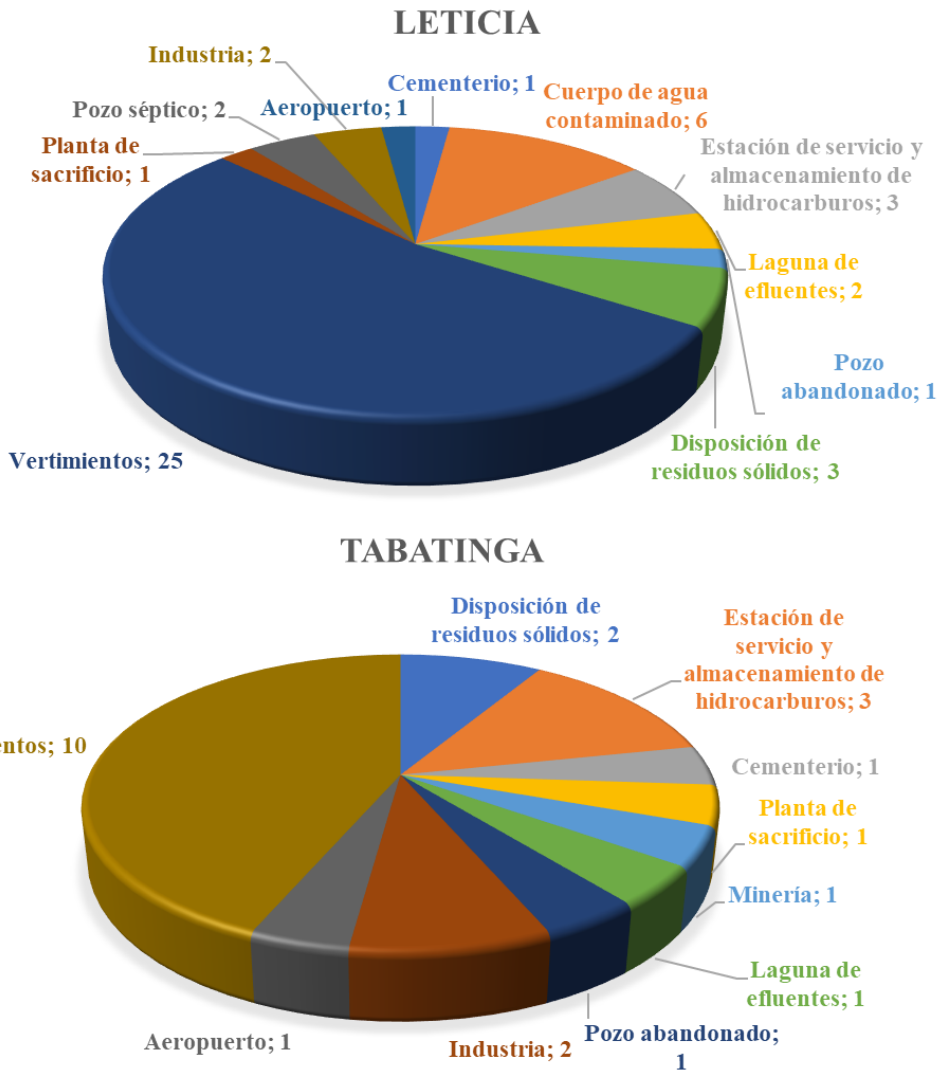
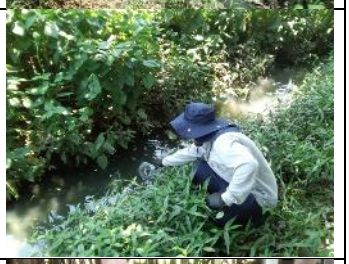


Figura 67. *Distribución porcentual de todas las fuentes potenciales de contaminación, de fuentes primarias y secundarias, en ambas ciudades. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Tabla 42. *Inventario de las fuentes potencialmente contaminantes caracterizadas en campo - Leticia. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Código	Fecha	Coordenadas- UTM Zone 19S		Cota (msnm)	Tipo de fuente de contaminación	Foto
		Este	Norte			
FC-DM-001	14/09/2022	389.863,83	9.548.261,74	84	Laguna de efluentes y disposición de residuos sólidos	
FC-NM-001	14/09/2022	390.444,20	9.547.737,34	89	Pozo séptico	
FC-DM-002	14/09/2022	394.935,79	9.538.388,90	100	Laguna de efluentes y disposición de residuos sólidos	
FC-DM-003	15/09/2022	395.278,91	9.535.094,28	65	Cementerio	
FC-DM-004	15/09/2022	394.875,31	9.534.860,40	87	Vertimiento doméstico	
FC-DM-006	16/09/2022	395.593,53	9.534.974,89	75	Cuerpo de agua contaminado	

Código	Fecha	Coordenadas- UTM Zone 19S		Cota (msnm)	Tipo de fuente de contaminación	Foto
		Este	Norte			
FC-DM-007	16/09/2022	395.957,49	9.534.849,43	80	Cuerpo de agua contaminado	
FC-DM-008	16/09/2022	395.787,91	9.534.858,43	84	Cuerpo de agua contaminado	
FC-DM-009	16/09/2022	396.296,77	9.534.739,28	78	Cuerpo de agua contaminado	
FC-DM-010	16/09/2022	396.447,71	9.534.846,94	87	Cuerpo de agua contaminado	
FC-DM-011	17/09/2022	396.223,12	9.534.444,39	71	Vertimiento doméstico	
FC-DM-012	17/09/2022	396.328,28	9.534.171,21	75	Vertimiento doméstico	

Código	Fecha	Coordenadas- UTM Zone 19S		Cota (msnm)	Tipo de fuente de contaminación	Foto
		Este	Norte			
FC-DM-013	17/09/2022	396.220,48	9.534.078,96	73	Vertimiento doméstico	
FC-DM-014	17/09/2022	396.242,11	9.534.042,13	78	Cuerpo de agua contaminado	
FC-DM-015	19/09/2022	395.060,69	9.534.532,04	58	Vertimiento doméstico	
FC-DM-016	19/09/2022	395.202,75	9.534.332,61	66	Vertimiento doméstico	
FC-DM-017	19/09/2022	395.215,25	9.534.197,51	73	Vertimiento doméstico	
FC-DM-018	19/09/2022	395.212,29	9.534.093,09	73	Vertimiento doméstico	

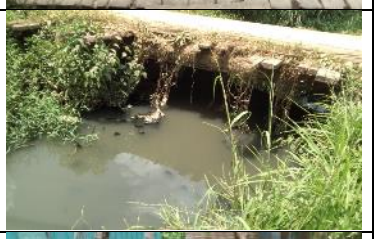
Código	Fecha	Coordenadas- UTM Zone 19S		Cota (msnm)	Tipo de fuente de contaminación	Foto
		Este	Norte			
FC-DM-019	19/09/2022	395.082,93	9.533.991,60	67	Vertimiento doméstico	
FC-DM-020	20/09/2022	395.154,04	9.533.828,93	45	Vertimiento doméstico	
FC-DM-021	20/09/2022	395.138,73	9.533.736,78	50	Vertimiento doméstico	
FC-DM-022	20/09/2022	395.764,65	9.533.694,55	69	Vertimiento doméstico	
FC-DM-023	20/09/2022	395.696,92	9.533.614,63	70	Vertimiento doméstico	
FC-DM-024	20/09/2022	395.619,98	9.533.500,91	71	Vertimiento doméstico	

Código	Fecha	Coordenadas- UTM Zone 19S		Cota (msnm)	Tipo de fuente de contaminación	Foto
		Este	Norte			
FC-NM-002	20/09/2022	395.339,09	9.533.767,74	89	Pozo abandonado	
FC-DM-025	21/09/2022	395.620,38	9.533.163,12	55	Vertimiento doméstico	
FC-DM-026	21/09/2022	395.863,73	9.533.338,45	67	Vertimiento doméstico	
FC-DM-027	21/09/2022	395.955,45	9.533.983,44	70	Vertimiento doméstico	
FC-NM-003	21/09/2022	396.036,15	9.533.532,12	108	Estación de servicio el Porvenir	
FC-DM-028	22/09/2022	396.109,83	9.533.793,23	75	Estación de servicio	
FC-NM-004	22/09/2022	395.755,21	9.546.819,38	69	Pozo séptico	

Código	Fecha	Coordenadas- UTM Zone 19S		Cota (msnm)	Tipo de fuente de contaminación	Foto
		Este	Norte			
FC-DM-029	23/09/2022	395.681,46	9.533.648,39	83	Planta de sacrificio	

Tabla 43. *Inventario de las fuentes potencialmente contaminantes caracterizadas en campo - Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Código	Fecha	Coordenadas -UTM Zone 19S		Cota (msnm)	Tipo de fuente de contaminación	Foto
		Este	Norte			
FC-DM-030	28/9/2022	396.461,51	9.533.621,69	81	Cementerio	
FC-DM-031	28/9/2022	395.229,74	9.532.416,42	86	Vertimiento	
FC-DM-032	28/9/2022	396.746,88	9.532.178,73	71	Vertimiento	
FC-DM-033	29/09/2022	396.519,55	9.531.499,79	73	Vertimiento	

Código	Fecha	Coordenadas -UTM Zone 19S		Cota (msnm)	Tipo de fuente de contaminación	Foto
		Este	Norte			
FC-DM-034	29/09/2022	395.246,00	9.531.722,43	76	Vertimiento	
FC-DM-035	29/09/2022	397.087,59	9.533.432,04	68	Vertimiento	
FC-NM-005	28/09/2022	396.563,72	9.533.228,74	75	Vertimiento	
FC-NM-006	28/09/2022	395.618,61	9.532.079,10	79	Vertimiento	
FC-NM-007	28/09/2022	397.282,81	9.532.603,14	89	Vertimiento	
FC-NM-008	29/09/2022	396.933,12	9.533.705,16	67	Vertimiento	

Código	Fecha	Coordenadas -UTM Zone 19S		Cota (msnm)	Tipo de fuente de contaminación	Foto
		Este	Norte			
FC-NM-009	7/10/2022	396.632,51	9.532.427,33	84	Disposición de residuos sólidos	
FC-NM-010	7/10/2022	395.519,44	9.532.508,90	90	Vertimiento	

8.1.1. Áreas urbanas sin sistema de alcantarillado

El mayor problema que afecta la calidad del agua subterránea consiste en la contaminación por condiciones de saneamiento básico precarias o inexistentes. Sustancias presentes en los efluentes de áreas urbanas, especialmente asociadas a disposición inadecuada de residuos sólidos y tratamiento inadecuado o inexistente de aguas residuales, degradan los cuerpos de agua superficiales y, posteriormente, pueden llegar contaminar el sistema acuífero.

En general, se ha evidenciado que en Leticia el sistema de alcantarillado es altamente deficiente, presentando fallas técnicas debido a la antigüedad de la red (más de 40 años), a una planificación inadecuada en cuanto al uso y ocupación del suelo a la gran cantidad de vertimientos que se presentan de forma descontrolada. El río Amazonas es empleado como el lugar de disposición final del alcantarillado, sin ningún tratamiento previo, generando contaminación y degradación del medio ambiente. Esta situación empeora en épocas lluviosas porque, al no existir un alcantarillado pluvial eficiente, se genera saturación del alcantarillado de aguas residuales, lo que ocasiona desbordamientos y reboses en diversas zonas de la región (OTCA & SHI SAS, 2015).

En el 2009 la empresa EMPUAMAZONAS E.S.P. S.A. prestaba el servicio de alcantarillado al 46,69% de las viviendas del municipio, mientras que el 53,31% restante debía depositar las aguas residuales directamente en el suelo o en cauces naturales (Pineda , 2009). Para el 2022, la empresa USPDL reporta que la cobertura del sistema de alcantarillado es del 56% (USPDL, 2022).

En Tabatinga, las aguas residuales pueden ser descargadas a la pequeña red pública de alcantarillado o, en muchos casos, puede ser vertido directamente al suelo o a un cuerpo de agua. Es muy común la solución individual para la eliminación de los residuos, como el uso de pozos sépticos y letrinas secas. Para el 2013, únicamente el 9,9% de la población contaba con sistema de

alcantarillado, mientras que el 21,8% optaban por soluciones individuales y el 68,3% restante no contaba ni con un sistema de recogida ni de tratamiento de las aguas residuales (ANA, 2022). En la Figura 68 se presenta el esquema del sistema de alcantarillado de Tabatinga.

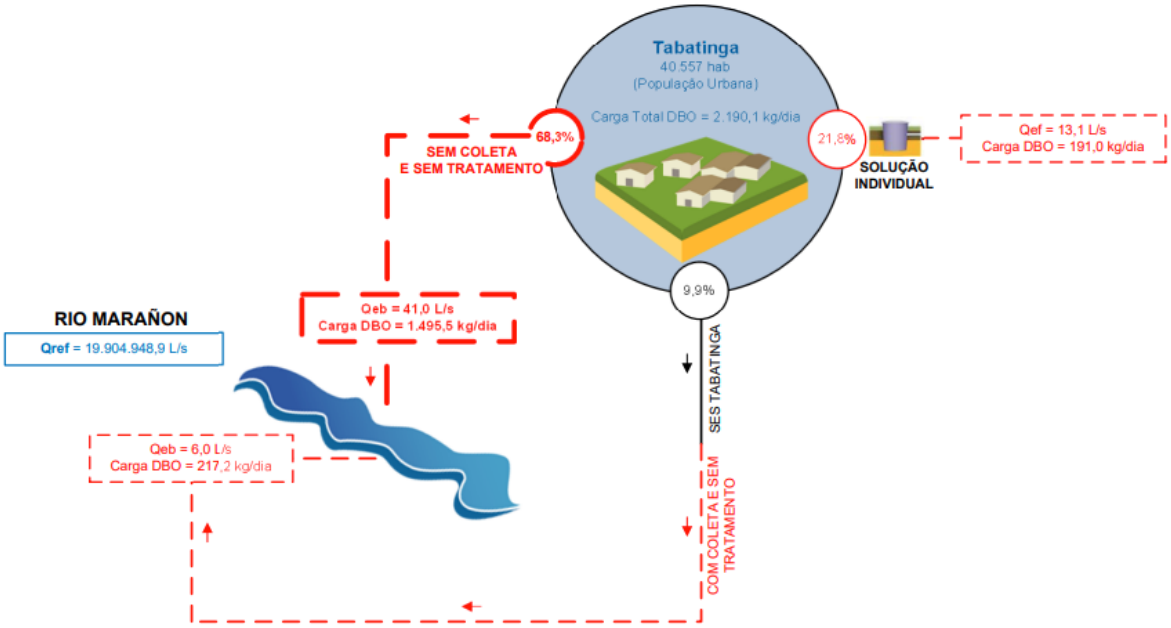


Figura 68. *Esquema del sistema de alcantarillado de Tabatinga. Tomado de: ANA, (2022).*

8.1.2. Cuerpos de agua contaminados y vertimientos

Como fue mencionado anteriormente, los drenajes de agua contaminados pueden afectar la calidad de agua subterránea al infiltrarse en el suelo, especialmente cuando son de agua de baja velocidad. En el área de estudio, dada la baja cobertura del sistema alcantarillado, las aguas domésticas y residuales son descargadas en muchos casos sobre cuerpos de agua o directamente sobre el suelo, sin tener ningún tipo de tratamiento previo.

Estos cuerpos de agua corresponden, en Leticia, a la laguna Yahuarcaca, las quebradas El Provenir, Simón Bolívar, San Antonio y los caños Gaitán y Calderón, los cuales desembocan, finalmente, en el río Amazonas; en Tabatinga el drenaje de las aguas residuales y pluviales se realiza en cunetas o zanjas a los costados de las calles y que desembocan directamente en el río Amazonas. Estas quebradas y drenajes se caracterizan por abundante caudal en época húmeda, pero durante la época seca presentan poco flujo e incluso aguas estancadas; además, se ha reportado que, en la temporada de altas precipitaciones, el nivel de las aguas superficiales aumenta e inunda varios terrenos, hacia la sabana selvática.

Debido a la alta cantidad de vertimientos presentes en la zona de Leticia (que para el año 2009 correspondían a 154 vertimientos individuales en la quebrada San Antonio, 32 en la quebrada El

Porvenir y 112 en la quebrada Simón Bolívar (Pineda , 2009), para su caracterización en campo estos son agrupados según la fuente superficial que los recibe y teniendo en cuenta si estos se encuentran aguas arriba o aguas abajo del cauce de interés.

En todos los vertimientos visitados se descarga agua residual doméstica, donde se observa agua turbia, de color grisáceo o verdoso, con un olor fétido y, generalmente, con presencia de grandes cantidades de residuos sólidos dentro del cuerpo de agua o en las inmediaciones; de los puntos inventariados, solo los FC-DM-004, FC-DM-012, FC-DM-013, FC-DM-016 y FC-NM-007 descargan directamente al suelo mientras que los puntos restantes lo hacen en un cuerpo de agua. En muchos casos, las aguas residuales pasan debajo de las casas, causando molestias a sus habitantes (Foto 10 y Foto 11).



Foto 10. *Vertimiento de aguas residuales domésticas – Punto: FC-DM-019. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*



Foto 11. *Cuerpo de agua contaminado – Punto:FC-DM-010. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

En la Tabla 44 se presentan los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de los vertimientos, medidos en campo.

Tabla 44. *Parámetros fisicoquímicos de los puntos de vertimiento y cuerpos de agua contaminados. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Código punto	pH (unidades de pH)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	SDT (mg/l)	Saturación (%)	Oxígeno disuelto (mg/l)	Temperatura (°C)
FC-DM-004	6,6	306	146	40,6	3,07	29,1
FC-DM-006	6,7	132	61	35,7	2,89	25,5
FC-DM-007	6,7	166	78	42,8	3,33	28,1
FC-DM-008	6,8	186	89	41,4	3,26	27,5
FC-DM-009	6,8	250	119	33,9	2,60	28,7
FC-DM-010	6,9	191	92	47,8	3,76	27,3
FC-DM-011	7,1	514	248	2,3	0,18	27,8
FC-DM-012	7,3	463	223	17,1	1,30	29,2
FC-DM-013	7,3	685	335	0,3	0,57	29,2
FC-DM-014	7,0	367	175	7,2	0,55	29,2
FC-DM-015	7,0	217	103	31,4	2,39	29,4
FC-DM-016	7,4	279	134	53,4	4,04	29,6
FC-DM-017	6,2	304	146	17,0	1,27	30,8
FC-DM-018	6,8	232	111	28,9	2,15	30,9
FC-DM-019	7,4	358	172	74,4	5,47	30,9
FC-DM-020	7,0	330	159	43,5	3,38	28,0
FC-DM-021	6,2	170	81	32,8	2,49	29,3
FC-DM-022	7,3	611	299	5,2	0,39	30,0
FC-DM-023	7,3	595	289	5,0	0,37	31,1
FC-DM-024	7,3	579	281	2,6	0,19	31,8
FC-DM-025	7,2	483	234	6,6	0,40	29,7
FC-DM-026	7,1	421	205	11,5	0,87	30,0
FC-DM-027	6,8	521	253	17,3	1,23	32,8
FC-DM-031	7,4	455	222	55,7	3,99	32,9
FC-DM-032	7,1	535	259	5,9	0,43	31,7
FC-DM-033	7,1	495	239	6,4	0,48	28,8
FC-DM-034	7,5	564	274	4,9	0,56	30,8
FC-DM-035	7,1	398	192	14,1	1,50	29,6
FC-NM-005	7,1	568	241	0,9	0,06	31,4
FC-NM-006	6,9	527	255	22,1	1,55	32,7
FC-NM-007	6,8	468	187	8,8	0,61	34,7
FC-NM-008	6,9	550	254	10,0	0,76	29,2

Código punto	pH (unidades de pH)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	SDT (mg/l)	Saturación (%)	Oxígeno disuelto (mg/l)	Temperatura (°C)
FC-NM-009	6,7	273	120	12,9	0,97	29,5
FC-NM-010	6,8	396	172	21,1	1,57	29,8

Los resultados de las mediciones *in situ*, tanto para los vertimientos como para los cuerpos de agua contaminados, indican que el pH de las aguas oscila entre ligeramente ácido y ligeramente alcalino, donde el promedio tiende hacia la neutralidad (6,99); el pH más bajo registrado es de 6,2 en el punto FC-DM-017 y el más alto corresponde al punto FC-DM-34, con un valor de 7,48.

En términos de la conductividad eléctrica se observa una diferencia entre las aguas contaminadas y los vertimientos de aguas domésticas. En general, este parámetro tiende a ser inferior en los cuerpos de agua con valores que varían entre 131 µS/cm y 250 µS/cm, exceptuando el punto FC-DM-014 que registra un valor de 367 µS/cm. Por su parte, la conductividad eléctrica en los vertimientos oscila entre 170 µS/cm y 685 µS/cm, con un promedio de 439 µS/cm.

Similar a lo observado en la conductividad eléctrica, se observa una disparidad en los sólidos totales entre los cuerpos de agua analizados y los vertimientos domésticos. La concentración de sólidos disueltos presenta valores inferiores en los cuerpos de agua, los cuales oscilan entre 61 mg/l y 119 mg/l, con la salvedad del punto FC-DM-014 que registra 175 mg/l. Para los puntos de vertimiento de aguas domésticas este parámetro varía entre 81 mg/l y 335 mg/l, donde el promedio es de 215 mg/l.

En cuanto a la concentración de oxígeno disuelto, los valores presentados son bajos, generalmente inferiores a 5,0 mg/l, los cuales fluctúan entre 0,06 mg/l y 5,47 mg/l. Los puntos de vertimiento registran las cifras más bajas con promedio de 1,5 mg/l, acordes con la naturaleza del agua residual doméstica; por otra parte, en los cuerpos de agua muestreados el promedio de oxígeno disuelto es mayor, con un valor de 3,1 mg/l.

Finalmente, la temperatura en todos los puntos analizados es bastante similar y se mantiene acorde con las características climáticas de la zona, con un promedio de 30°C.

8.1.3. Disposición de residuos sólidos

El relleno sanitario de Leticia (FC-DM-001) está ubicado en el km 17,2 de la vía Leticia-Tarapacá con una capacidad de 704 toneladas/mes. Es un relleno tipo trinchera que se llena por niveles, cuya capacidad en área es de 34,5 ha. Su operación empezó a finales de 2014 y actualmente hay diversos problemas de operación, siendo investigado por la superintendencia de servicios públicos y la contraloría departamental del Amazonas por incumplimiento en normas de construcción y operación. Su área de influencia comprende la quebrada Yahuarcaca, la quebrada Humurutu y la comunidad del km 18, además de las fincas ubicadas en el sector del km 18 al km 16 (Fiduciaria Petrolera - Consorcio RS-06, 2007), Foto 12.

En el municipio de Leticia también se encuentra el antiguo botadero a cielo abierto (FC-DM-002), anteriormente ubicado en el km 4 de la vía Leticia-Tarapacá. Este sitio de deposición final de residuos principalmente de origen doméstico fue intervenido y cerrado por no dar cumplimiento a la normatividad vigente para su adecuada operación. Entró en su etapa de cierre y clausura en el 2005; sin embargo, contaba con autorización para operar hasta abril de 2014. El área de influencia de este foco comprende la quebrada Yahuarcaca, con una importante cercanía a la bocatoma del acueducto municipal (km 2,5) y en general a sectores poblados como San Sebastián, Castañal y la comunidad del km 6. El botadero comprende un área aproximada de 10,9 ha (OTCA & SHI SAS, 2015).



Foto 12. *Relleno sanitario de Leticia – Punto FC-DM-001. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

En Tabatinga, a pesar de que aproximadamente el 70% de la población cuenta con servicio de recolección de residuos sólidos domésticos (Instituto Água e Saneamento, 2022), se observa que una gran cantidad de residuos como botellas, plásticos, icopor y cartón son dispuestos directamente en cuerpos de agua, lo que contribuye a la contaminación de estos drenajes y puede ocasionar una disminución en la velocidad de flujo del agua o incluso su represamiento, Foto 13. Adicionalmente, el municipio no dispone de un relleno sanitario adecuado, sino que toda la basura recogida se deposita en el suelo a cielo abierto sin orden, sin compactación y sin ninguna medida de protección; esta situación se agrava en épocas de lluvia, debido a que el agua se acumula y puede infiltrarse con mayor facilidad y arrastrar un mayor número de contaminantes (Muniz, 2018).



Foto 13. *Residuos sólidos dispuesto en un cuerpo de agua - FC-NM-009. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

8.1.4. Lagunas de efluentes

Los lixiviados son líquidos de color oscuro, originados por la descomposición y putrefacción de la materia orgánica en vertederos. Los procesos biológicos, químicos y físicos de descomposición de los residuos orgánicos sumado a la acción del agua precipitada, al fluir, disuelve las sustancias y arrastra las partículas contenidas en los residuos. Esta se considera la principal fuente de contaminación de las aguas subterráneas en un relleno.

El relleno sanitario de Leticia (FC-DM-001) cuenta con una red de drenaje dispuesta en el fondo y en las zonas intermedias del relleno para captar y transportar el lixiviado hasta cuatro unidades lagunares con impermeabilizantes que reciben la descarga, donde se eliminan gran cantidad de los sólidos suspendidos, y luego los lixiviados son enviados a un tanque UASB para su tratamiento y finalmente son conducidos mediante una tubería de PVC hasta un drenaje natural. El agua de las lagunas se observa de color gris verdoso, turbia y con materia orgánica, Foto 14.

El antiguo botadero (FC-DM-002) de leticia todavía se considera como una fuente potencial de contaminación, aunque actualmente no esté en operación, dado que la incidencia de lixiviados procedentes desde la superficie de este sitio de deposición puede seguir afectando por muchos años las aguas subterráneas del sector. Actualmente se observa una laguna de aproximadamente 50 m x 30 m, con aguas estancadas de color verde, con olor fuerte y materia orgánica; la laguna presenta procesos de eutrofización (Foto 15), y se observa la presencia de residuos sólidos en las inmediaciones.



Foto 14. *Laguna de efluentes del relleno sanitario de Leticia – Punto FC-DM-001. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*



Foto 15. *Laguna de efluentes del antiguo botadero – Punto FC-DM-002. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

8.1.4.1. Plantas de tratamiento de agua

El municipio de Tabatinga cuenta con un sistema de tratamiento de agua, operado por la empresa COSAMA, en donde se realizan procesos de tratamiento como floculación, decantación, filtración y desinfección con cloro y sulfato de aluminio. Sin embargo, a pesar de esto, el agua muchas veces llega a las residencias con mal olor y coloración amarillenta (Muniz, 2018). El agua para el uso doméstico proviene del río Amazonas, en el cual es común el tránsito de barcos de carga y de pasajeros y que, además, es empleado como lugar de disposición final del alcantarillado de Leticia sin ningún tipo de tratamiento previo. Esto hace factible la presencia de una carga importante de material orgánico y microorganismos patógenos, junto con una gran cantidad de nutrientes y sales y de compuestos tóxicos, que podrían llegar al sistema acuífero en caso de fugas o filtraciones de los tanques de almacenamiento y tratamiento. Adicionalmente, se reporta que para el año 2019 las

instalaciones presentan estructuras desgastadas, reservorios rotos, tanques dosificadores de agua que requieren reparación, depósitos sucios y almacenes con materiales en mal estado (COSAMA, 2019). La cobertura del sistema de acueducto en Tabatinga para 2022 fue buena, del 80% (COSAMA, 2022).

A su vez, en Leticia, el agua del sistema de acueducto proveniente del río Yahuarcaca pasa por un sistema de tratamiento que consta de dos estaciones, una de floculación, decantación y cloración con un caudal de 72 l/s, y una segunda de floculación, sedimentación de alta velocidad, filtro rápido y cloración con un caudal de 50 l/s que actualmente no está en funcionamiento. La cobertura del sistema de acueducto es insuficiente, pues en 2022 era del 50,4% (USPDL, 2022).

8.1.5. Estaciones de servicio y lugares de almacenamiento de hidrocarburos

Las estaciones de servicio o gasolineras pueden ser una fuente de contaminación por hidrocarburos muy importante debido a que los tanques de almacenamiento de gasolina generalmente son subterráneos y una fisura puede crear fugas de gasolina hacia el acuífero, especialmente si los tanques son antiguos; en estos lugares también se manipulan sustancias como lubricantes, engrasantes, aceites y otros derivados que pueden encontrar un camino hacia las aguas subterráneas si no se manejan de la forma adecuada. Lugares como aeropuertos y centrales termoeléctricas también representan una fuente potencial de contaminación al emplear, almacenar y transportar grandes cantidades de hidrocarburos.

El municipio de Leticia cuenta con dos estaciones de servicio: Estación Terpel (FC-DM-028), Foto 16, ubicada en la vía Internacional y Estación distribuidora El Porvenir (FC-NM-003), ubicada en el casco urbano. Ambas estaciones se encuentran en buen estado, cuentan con un sistema de trampas de grasa y los residuos peligrosos son eliminados cada mes mediante una empresa especializada llamada ORIGEN SAS; adicionalmente, el manejo de las sustancias como lubricantes y aceites por parte del personal parece adecuada y no se evidencian problemas durante la visita de campo.

La estación de servicio de El Porvenir cuenta, adicionalmente, con un lavadero equipado con mangueras, rampas y rejillas para canalizar las aguas y grasas, de modo que esta actividad no representa una fuente de contaminación importante del agua subterránea.



Foto 16. *Estación de servicio– Punto FC-DM-028. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Adicionalmente, Leticia cuenta con la Planta de Abastecimiento Terpel donde se realizan operaciones de recepción, almacenamiento y distribución de combustibles provenientes de la ciudad de Puerto Asís (Putumayo), de Brasil y del Perú. En esta planta se manejan tres tipos de combustibles: Gasolina motor, ACPM (o *Diesel Oil*) y combustible para aviones (JET-A1); los dos primeros se distribuyen en carrotanques para su comercialización, mientras que el combustible de avión es bombeado a través de una línea con destino al aeropuerto de Leticia "Alfredo Vásquez Cobo". En esta planta, las aguas lluvias susceptibles de contaminarse con combustibles y las generadas en el procedimiento de drenaje de tanques son tratadas en un separador API. Los lodos generados son de carácter aceitoso y se ha establecido un periodo de retiro cada 2 años, los cuales son enterrados en un lugar contiguo al separador (CORPOAMAZONIA, 2008).

Por su parte, Tabatinga cuenta con tres estaciones de servicio: Posto ATEM Voyager, ubicada en la calle Marechal Rondon, AutoPosto Tabatinga, localizado sobre la calle Barbosa (Figura 17) y Posto ATEM, sobre la calle Marechal Mallet. Dadas las condiciones de orden público que se presentaban en la zona durante el trabajo de campo, se cuenta con poca información sobre las estaciones de Tabatinga. Sin embargo, se pudo observar que el almacenamiento de los tanques de combustible es subterráneo y, en general, las estaciones se encuentran en buen estado. Se resalta que, debido al elevado precio de los combustibles en Brasil durante la visita, los lugareños prefieren abastecerse en la ciudad vecina de Leticia.



Foto 17. *Estación de servicio Auto Posto Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

8.1.6. Cementerios

Los cementerios constituyen una fuente potencial de contaminación, ya que, después de la muerte, el cuerpo humano inicia el proceso de descomposición y se convierte en un ecosistema formado por artrópodos, bacterias, microorganismos patógenos y destructores de materia orgánica. Por ello, los cementerios, también conocidos como necrópolis, se caracterizan por la producción de gases como el metano (CH_4), por la presencia de organismos patógenos y por la producción de necrolixiviados, que están compuestos por un 60% de agua, un 30% de sales minerales disueltas y un 10% de sustancias biodegradables complejas, llamadas diaminas tóxicas, conocidas como putrescina (1,4 butanodiamina) y cadaverina (1,4). ,5 pentanodiamina) (Pacheco, 2000). Estas sustancias pueden influir en la calidad de las aguas subterráneas cercanas. La situación se agrava si el nivel freático es poco profundo, como en las regiones de Leticia y Tabatinga.

El cementerio de Leticia “Jardines del recuerdo” (FC-DM-003), ubicado en zona urbana en la Avenida Vásquez Cobo, tiene una extensión aproximada de 15000 m^2; en este las tumbas son enterradas a una profundidad de 3 metros y se reporta que los restos humanos son retirados cada 10 años y los residuos que no logran descomponerse totalmente con el tiempo, son incinerados y posteriormente son dispuestos mediante una empresa de aseo especializada. En este punto se puede observar adicionalmente una poceta de agua, la cual es abastecida por el acueducto municipal y que es empleada para lavar las herramientas; en general, el agua presenta tonalidades claras, casi incolora y no emite olor (Foto 18).



Foto 18. *Cementerio de Leticia "Jardines del recuerdo" –Punto FC-NM-003.Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

El cementerio "*São Lazaro*" (FC-DM-030, Foto 19) tiene una extensión aproximada de 16.600 m^2 y se ubica en la zona urbana de Tabatinga, en las inmediaciones a la frontera con Colombia. En este cementerio se reporta que el levantamiento de los restos humanos se realiza cada 3 años y los desechos se vierten al sistema de alcantarillado. Además, se observa residuos sólidos como botellas de PET, bolsas de plásticos y escombros en las inmediaciones de algunas tumbas.



Foto 19. *Cementerio Sao Lázaro de Tabatinga – FC-DM-030. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

8.1.7. Otras fuentes de contaminación

En la región de Leticia y Tabatinga se reconocen otras actividades que pueden ser fuentes potenciales de contaminación. Entre estas se encuentran los pozos sépticos y pozos abandonados, industrias, plantas de sacrificio y actividades mineras.

Como se mencionó anteriormente, debido a las deficiencias en el sistema de acueducto y alcantarillado, es muy frecuente el uso de pozos como fuentes para el abastecimiento de agua y de pozos sépticos o letrinas para disponer los desechos. Los pozos construidos deficientemente o abandonados, como es el caso de los puntos FC-NM-002 y PZ-NM-49, pueden actuar como conductos a través de los cuales los contaminantes viajan hasta llegar directamente en el sistema

acuífero. Por su parte, los pozos sépticos (FC-NM-001 y FC-NM-004), cuando no cuentan con las medidas sanitarias adecuadas, pueden formar lixiviados que se infiltran en el subsuelo (Foto 20).



Foto 20. *Pozo séptico – Punto FC-NM-004. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

La planta de sacrifico municipal o matadero (FC-DM-029) se encuentra ubicada en zona residencial del municipio de Leticia, en el barrio La Florida, afectando las condiciones ambientales de la zona, Foto 21. En la actualidad no está en funcionamiento debido a que hace 3 años se impuso una tutela porque la planta de sacrificio no contaba con las medidas preventivas adecuadas, generaba malos olores y el manejo de los residuos sólidos y líquidos era inadecuado, afectando a las residencias vecinas.



Foto 21. *Planta de sacrificio abandonada – Punto FC-DM-029. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

A su vez, el municipio de Tabatinga cuenta con una planta de sacrificio localizada al noreste de la ciudad. Debido a que Tabatinga no tiene productores de ganado, los animales provienen de Itacoatiara en Amazonas y de Rondônia. Parte del ganado va al matadero municipal de Benjamín Constant y otros se quedan en el municipio de Tabatinga. Se ha observado que el lugar cumple con las normas ambientales e higiénicas para que la carne llegue con calidad al consumidor. Sin embargo, este tipo de actividad puede generar fuertes olores, acumulación de residuos sólidos y vertimientos de aguas residuales que pueden impactar la calidad del agua subterránea.

Entre las actividades industriales se destaca las centrales termoelécticas. En Leticia está ubicada en la parte suroriental del municipio, en la que se genera energía eléctrica a partir de combustibles fósiles como Fuel Oil y Diesel 2. Dentro de su infraestructura cuenta con un sistema de filtrado de combustible y un control de aceites e hidrocarburos en el canal de la estructura de entrada y en el sistema de tratamiento del efluente industrial. También cuenta con un sistema de biorremediación para el tratamiento de los lodos contaminados y residuos oleosos, el cual consta de una piscina con capacidad de 600 m^3 para tratar los residuos. Adicionalmente, la central tiene un permiso de vertimiento de aguas residuales de origen industrial a la quebrada San Antonio, donde las aguas deben ser tratadas previamente mediante una PTARI (CORPOAMAZONIA, 2013; Cuadrado & Puentes, 2011).

La central termoeléctrica en Tabatinga (Foto 22), localizada en el extremo sur de la ciudad, produce energía eléctrica a partir de generadores movidos por biodiesel, como alternativa a la antigua central de generadores Diesel. Entre los equipos con los que cuenta la nueva termoeléctrica, se encuentra un tanque de almacenamiento de combustible, caja separadora de aguas y aceites y un sistema de protección. Los tanques son de acero al carbono, material escogido por su resistencia a la corrosión, y se encuentran ubicados dentro de una cuenca de contención revestida con hormigón, para evitar la filtración y contaminación al subsuelo en caso de fuga. La caja separadora de agua y aceite se basa en el principio de coalescencia y permite que las partículas de aceite y grasas se separen por gravedad del agua. La central dispone de todos los elementos de protección necesarios en caso de incendios e instalaciones para evitar las fugas de combustible, así como de balsas y canales de contención en caso de que ocurran fugas (IBAMA, 2017).



Foto 22. *Termoeléctrica de Tabatinga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Adicionalmente, en la antigua localización de la termoeléctrica de Tabatinga, se observan grandes tanques de almacenamiento abandonados a los cuales no se les realizaron las medidas adecuadas de disposición, por lo que actualmente contribuyen en la generación de residuos sólidos y líquidos, Figura 69.



Figura 69. *Antigua Termoeléctrica de Tabatinga. Tomada de Google Earth (2022).*

En el municipio de Tabatinga existen empresas dedicadas a la fabricación de ladrillos, actividad que ha ganado relevancia en los últimos años debido a la expansión de la zona urbana, Figura 70. Esta actividad se ha desarrollado sin los estudios necesarios para conocer, evaluar los impactos y las repercusiones ambientales (da Costa et al., 2009; Rodrigues, 2016).; además, la selección de las zonas de exploración, así como los métodos de extracción de minerales de arcilla, se ha realizado de forma empírica, sin supervisión de los organismos competentes. Entre los principales impactos que tiene esta actividad, se encuentra la deforestación de árboles nativos, acompañado de un

aumento en la erosión del suelo; la erosión a su vez conlleva a la acumulación de sedimentos y partículas contaminantes en los cuerpos de agua. En algunos casos, el considerable aumento en los sedimentos en los cuerpos de agua ha generado la desaparición de estos, lo que a su vez ha impactado el nivel freático, el cual ha disminuido paulatinamente en la zona en los últimos años. En general, se observa que la extracción la arcillas afecta la dinámica de las aguas superficiales y subterráneas, ocasionando la interrupción y cambio en los flujos de agua; además, en lagunas y en grandes depresiones en el terreno se almacenan grandes cantidades de agua, que pueden acumular contaminantes provenientes de la misma actividad industrial o de fuentes cercanas, como el relleno sanitario, contaminantes que posteriormente se pueden infiltrar hasta llegar al sistema acuífero(da Costa et al., 2009; Rodrigues, 2016).



Figura 70. *Zonas de extracción de material para la elaboración de ladrillos. Tomada de Google Earth (2022) .*

8.2. Clasificación de la carga potencial al suelo

La amenaza de contaminación del agua subterránea hace referencia a las fuentes potenciales de contaminación resultantes de diversas actividades antrópicas que tienen lugar principalmente en superficie. Los principales impactos se producen por el manejo de sustancias nocivas o peligrosas, a través de su producción, transporte, almacenamiento y eliminación, así como su uso en las diferentes actividades (Zwahlen, 2003). Las fuentes potenciales de contaminación identificadas en la zona de estudio fueron divididas en fuentes puntuales, lineales y difusas y clasificadas según su probabilidad de generar mayores o menores cargas contaminantes al acuífero en 3 categorías cualitativas (baja, media, alta) a partir de la metodología POSH que tiene en cuenta el origen del contaminante y la carga hidráulica asociada a cada actividad (Foster et al., 2022).

En la Tabla 45 y Tabla 46, se presenta la clasificación de cada fuente contaminante. Se observa que, en la zona de estudio, las fuentes de cargas contaminantes reducidas están ubicadas en las zonas rurales y de expansión de Leticia y Tabatinga y en las inmediaciones a los cementerios, a las plantas de sacrificio, a las industrias de bebidas, a pozos abandonados y a los aeropuertos; las cargas contaminantes moderadas se asocian a las zonas de disposición de residuos sólidos, a las lagunas de efluentes, a la explotación minera para la fabricación de ladrillos, a las estaciones de servicio y lugares de almacenamiento de hidrocarburos, a los cuerpos de agua contaminados y a la zona urbana del municipio de Leticia, que cuenta con cerca del 56% de cobertura de alcantarillado; finalmente, las cargas contaminantes elevadas están asociadas principalmente a las zonas urbanas del municipio de Tabatinga, donde la cobertura del sistema de alcantarillado es casi inexistente.

De manera adicional, y teniendo en cuenta que para un mismo tipo de fuente contaminante pueden existir diversos factores que aumenten o disminuyan la probabilidad de que se produzca una contaminación real a las aguas subterráneas como las medidas de seguridad implementadas, el nivel de mantenimiento, el modo de disposición del contaminante o las condiciones circundantes, a cada fuente potencial de contaminación identificada se le asigna un peso que considere el nivel de toxicidad de las sustancias asociadas y las condiciones particulares de cada sitio, partiendo de los pesos propuestos en Zwahlen (2003), Tabla 46. Para las fuentes potenciales de contaminación abandonadas se asume que tienen el mismo peso que las fuentes actuales, según lo propuesto en la metodología de POSH (Foster et al., 2022).

Tabla 45. *Clasificación de las cargas potenciales de contaminación de las fuentes difusas y lineales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Fuentes contaminantes lineales	**Modo de disposición del contaminante**	**Perspectiva histórica**	**Clasificación**
Cuerpos de agua contaminados	Superficie	Actual	Medio
Fuentes contaminantes difusas	**Modo de disposición del contaminante**	**Perspectiva histórica**	**Clasificación**
Zona urbana de Leticia	Superficie	Actual	Medio
Zona urbana de Tabatinga	Superficie	Actual	Alto
Zonas rurales	Superficie	Actual	Bajo

Tabla 46. *Clasificación de las cargas potenciales de contaminación de las fuentes puntuales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Fuentes contaminantes puntuales	Modo de disposición del contaminante	Perspectiva histórica	Clasificación	Peso
Disposición de residuos sólidos				
Relleno sanitario de Leticia (FC-DM-001)	Superficie	Actual	Medio	50
Antiguo botadero de Leticia (FC-DM-002)	Superficie	Abandonado	Medio	50
Relleno sanitario de Tabatinga	Superficie	Actual	Medio	55
Laguna de efluentes				
Relleno sanitario de Leticia (FC-DM-001)	Superficie	Actual	Medio	55
Antiguo botadero de leticia (FC-DM-002)	Superficie	Abandonado	Medio	55
Planta de tratamiento COSAMA	Superficie	Actual	Medio	50
Industrias				
Industrias de bebidas (Gaseosas Leticia)	Superficie	Actual	Bajo	30
Termoeléctrica Leticia	Superficie	Actual	Medio	65
Termoeléctrica Tabatinga	Superficie	Actual	Medio	65
Antigua termoeléctrica Tabatinga	Superficie	Abandonado	Medio	65
Explotación minera				
Ladrilleras	Superficie	Actual	Medio	45
Desarrollo urbano				
Cementerio Leticia (FC-DM-003)	Subsuperficial	Actual	Bajo	35
Cementerio Tabatinga (FC-DM-030)	Subsuperficial	Actual	Bajo	35
Antigua planta de sacrificio Leticia (FC-DM-029)	Superficie	Abandonado	Bajo	25
Planta de sacrificio Tabatinga	Superficie	Actual	Bajo	35
Planta Terpel	Superficie	Actual	Medio	65
Gasolinera 1 (FC-NM-003)	Superficie	Actual	Medio	55
Gasolinera 2 (FC-DM-028)	Superficie	Actual	Medio	55
Gasolinera T 1	Subterránea	Actual	Medio	60
Gasolinera T 2	Subterránea	Actual	Medio	60
Gasolinera T 3	Subterránea	Actual	Medio	60
Aeropuerto Leticia	Superficie	Actual	Bajo	30
Aeropuerto Tabatinga	Superficie	Actual	Bajo	30
Pozos abandonados (FC-NM-002 PZ-NM-49)	Subterráneo	Abandonado	Bajo	30

Las fuentes puntuales suelen formar penachos o plumas de contaminación, las cuales se caracterizan por presentar las mayores concentraciones de contaminantes en los lugares cercanos a la fuente y las concentraciones más bajas en los lugares más alejados. Por este motivo, a cada fuente puntual se le realiza un buffer que represente, de manera aproximada, el área posiblemente afectada por la contaminación de forma que las mayores cargas contaminantes se ubiquen en el centro y las menores cargas contaminantes en los extremos.

El radio de la zona potencial de contaminación fue determinado a partir de los valores propuestos en diversos estudios elaborados en acuíferos aluviales cuaternario (Zhang, et al., 2017; Deng, et al., 2022), los cuales tienen en cuenta el tipo de actividad y consideran las propiedades físicas y químicas, la degradación y la migración de diferentes contaminantes. En la Tabla 47 se presenta los radios empleados para cada tipo de actividad contaminante y en la Figura 71 la distribución espacial de la carga contaminante para las fuentes puntuales.

Tabla 47. *Radio de influencia para cada tipo de actividad contaminante. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Fuente contaminante	Tipo de actividad contaminante	Radio (km)
Minería o explotación de hidrocarburos	Minería de materiales estériles	1,0
Industria	Industria alimentaria y de bebidas	1,0
	Generación de energía (termoeléctricas)	1,5
	Otras industrias	1,0
Venta y almacenamiento de hidrocarburos	Estaciones de servicio	1,5
	Aeropuertos	1,0
Rellenos sanitarios	Residuos sólidos domésticos	2,0
	Lagunas de efluentes domésticas	2,0

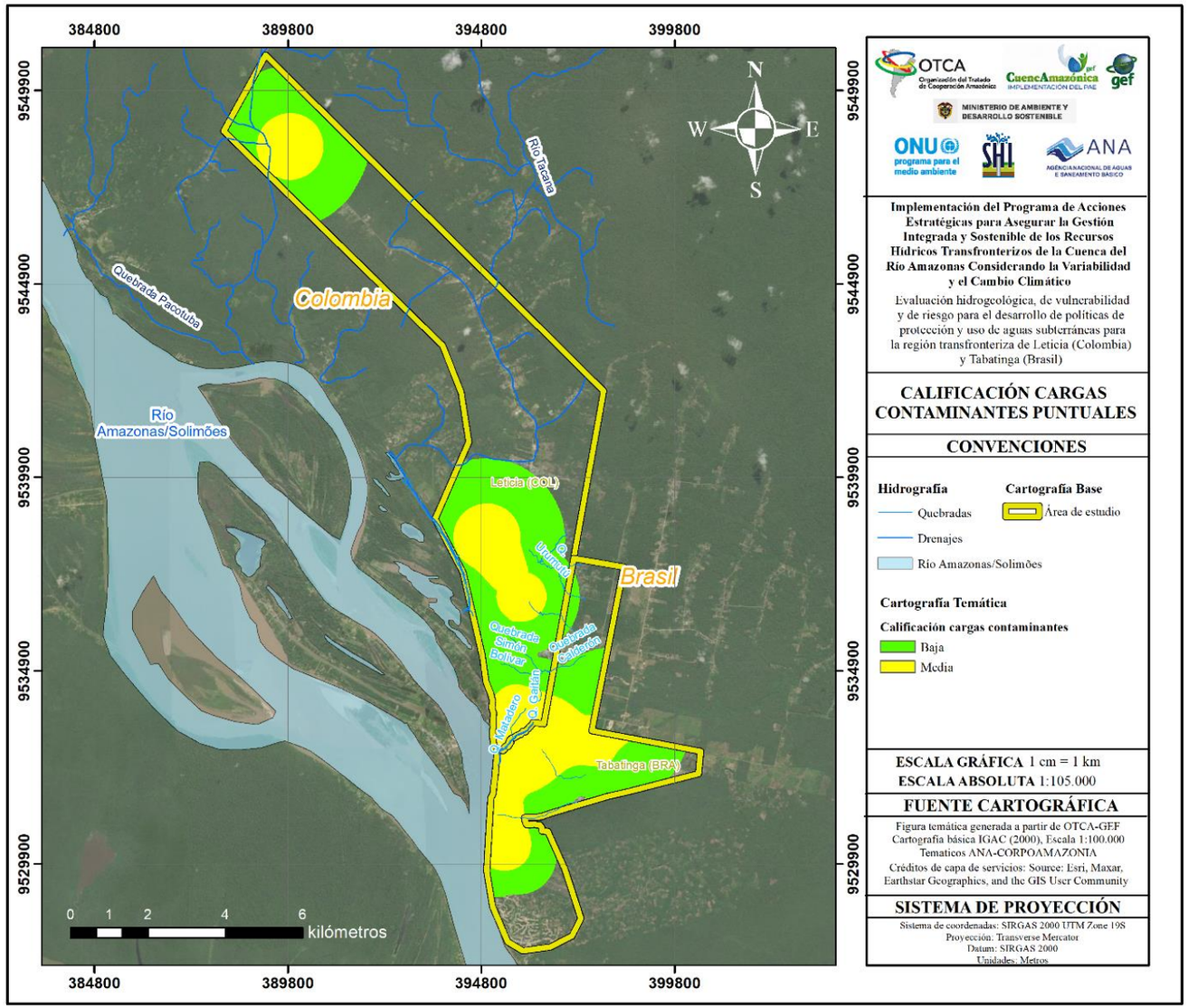


Figura 71. *Distribución de las cargas potencialmente contaminantes de las fuentes puntuales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

A diferencia de las fuentes puntuales, las cargas contaminantes difusas se originan en grandes áreas y pueden transportarse de muchas maneras hasta que alcanzan el cuerpo de agua receptor. Sin embargo, en la mayoría de los casos, no es posible monitorear los contaminantes desde el punto de origen, ya que la fuente exacta de la descarga y los medios de difusión del contaminante son extremadamente difíciles de identificar. Generalmente, la contaminación difusa surge de operaciones consecutivas sobre grandes áreas, por lo que los impactos no son locales, sino que tienden a afectar una gran área, como es el caso de la falta de saneamiento *in situ* de aguas residuales domésticas identificado en la región. Por esta razón, las fuentes difusas se mapean como el área total cubierta por cada fuente contaminante (Figura 72).

La carga potencial contaminante total corresponde a los efectos combinados de las cargas contaminantes puntuales y difusas, de forma que en los lugares donde estas se superponen, la clasificación de la carga contaminante total se obtiene de la sumatoria de los pesos asociados a las cargas difusas y puntuales (Zhang, et al., A GIS-based LVF model for semi-quantitative assessment of groundwater pollution risk: A case study in Shenyang, NE China, 2017). En la Figura 73 se observa que aproximadamente el 70% de la zona de estudio está expuesta a cargas contaminantes bajas, las cuales se concentran en las zonas rurales ambos municipios. El 18% corresponde a zonas con cargas contaminantes medias, ubicadas de manera predominante en las cercanías a zonas de disposición de residuos sólidos, lugares de almacenamiento de hidrocarburos y las termoeléctricas. El 12% restante pertenece a los lugares con cargas contaminantes altas, los cuales se presentan en la zona urbana de Tabatinga y al sur de la zona urbana de Leticia, que corresponde principalmente a los vertimientos y al saneamiento *in situ* de las aguas residuales de origen doméstico y a la presencia de diversas fuentes de contaminación puntuales como estaciones de servicio e industrias

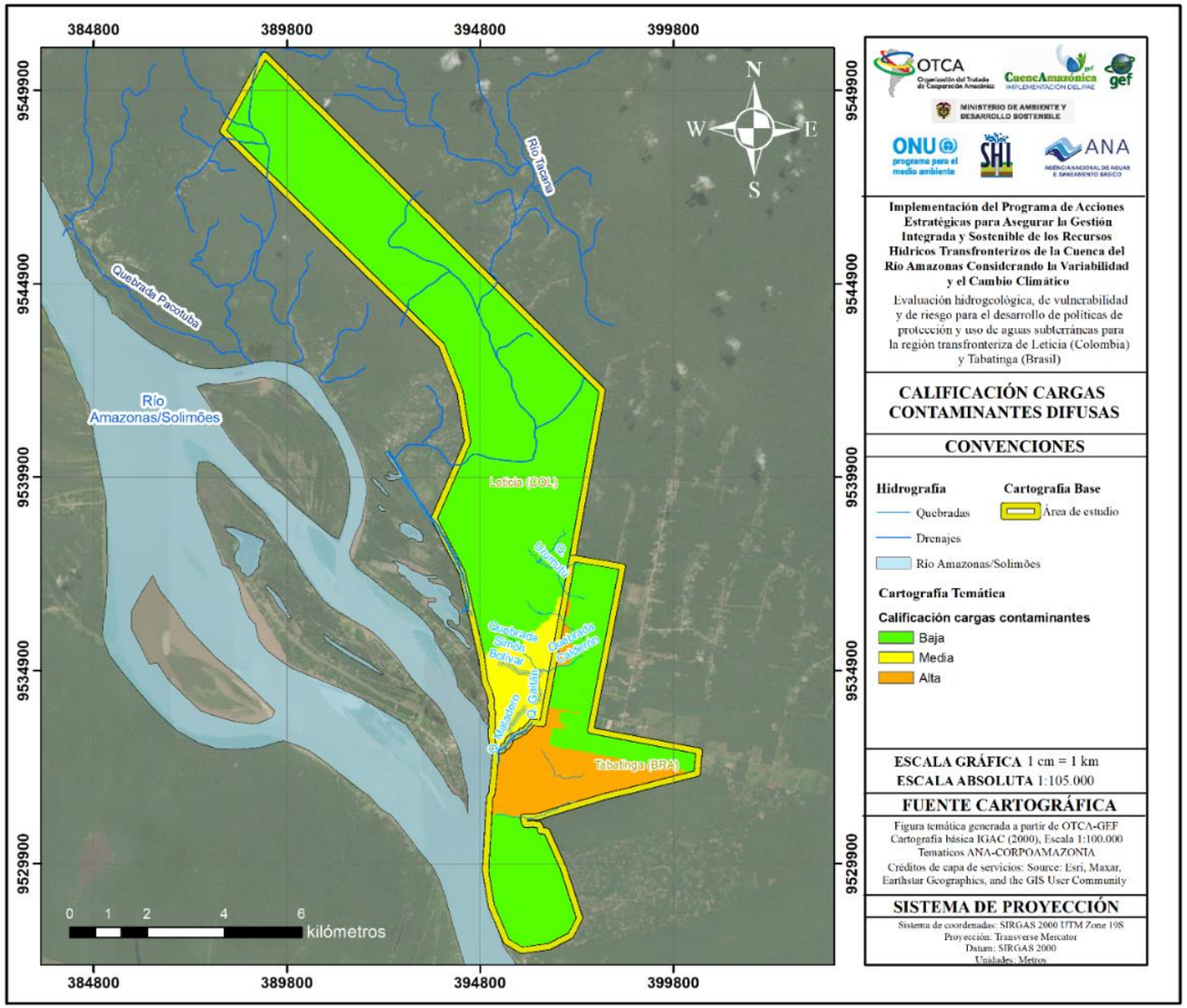


Figura 72. *Distribución de las cargas potencialmente contaminantes de las fuentes difusas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

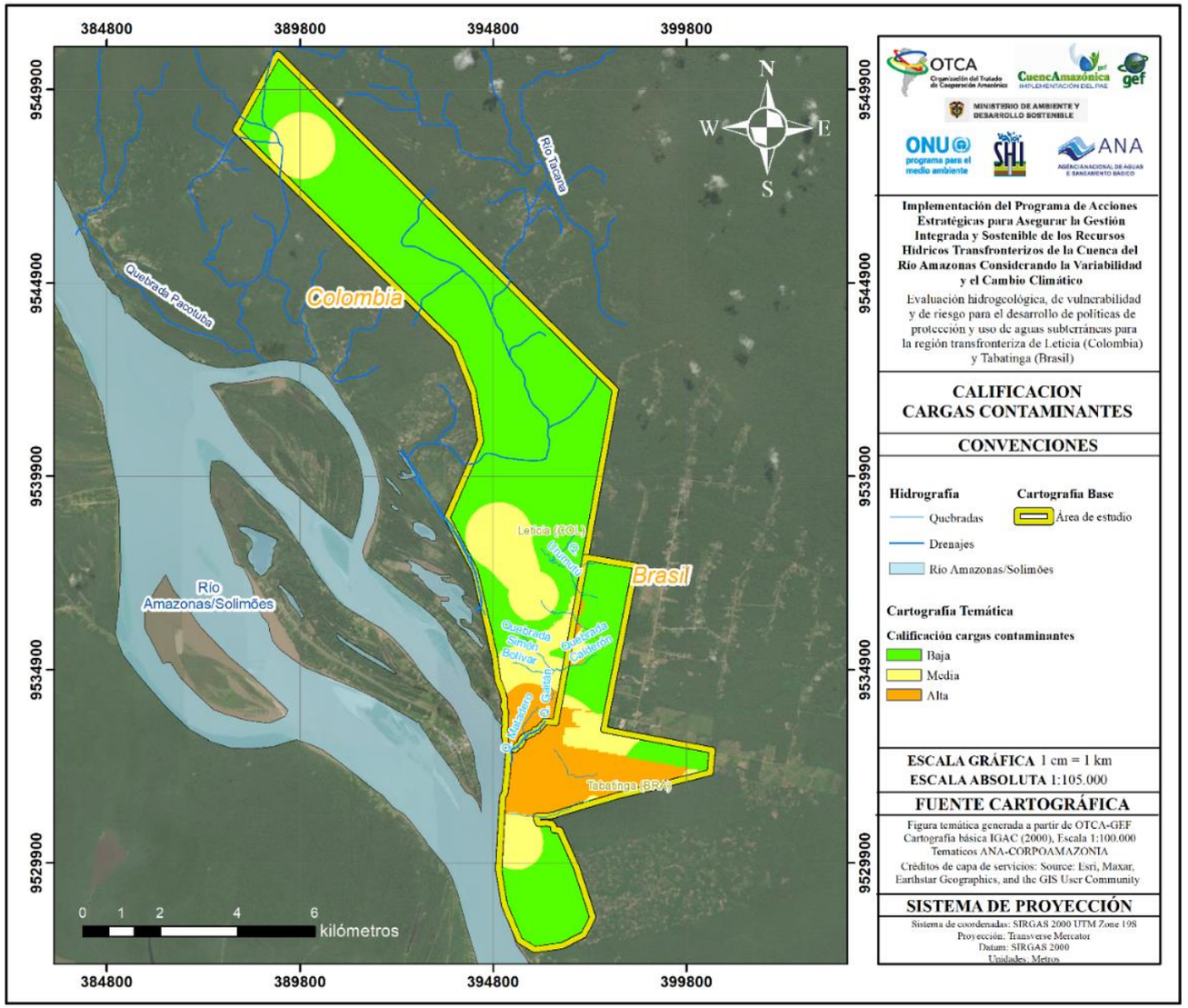


Figura 73. *Distribución de la carga contaminante potencial al suelo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

8.3. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero

El término vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos hace referencia a la facilidad con la que los contaminantes, producidos por actividades antrópicas, pueden ingresar al acuífero bajo ciertas condiciones geológicas e hidrogeológicas, lo cual solo está determinado por las propiedades intrínsecas del acuífero. Para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos se han desarrollado distintas metodologías, como GOD y DRASTIC.

8.3.1. Método GOD

Este método establece la vulnerabilidad del acuífero como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada, como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes, (Foster et al., 2022). Para esto se emplean tres variables:

- Ocurrencia del agua subterránea (G)
- Substrato litológico (O)
- Profundidad del nivel del agua (D)

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = G*O*D$$

El índice por condición de confinamiento del acuífero u ocurrencia del agua subterránea se evalúa en función de las características acuíferas asociadas a cada unidad hidrogeológica.

Las rocas con porosidad primaria que presentan semiconfinamiento se evalúan como un rango medio, por la capacidad de asimilación de contaminantes y las velocidades bajas a moderadas de transmisión de estos. Las unidades no consolidadas de características libres se evaluaron con el valor máximo, pues presentan las zonas de mayor vulnerabilidad por la transmisión directa de las posibles cargas contaminantes, Tabla 48.

Tabla 48. *Ponderadores empleados según la ocurrencia del agua subterránea. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Unidad hidrogeológica	Características	Ponderador
HTia	Formaciones semiconfinadas a libres que contienen agua y la transmiten lentamente	0,4
HQalTsa	Formaciones libres que almacenan y transmiten agua	1,0

El substrato litológico hace referencia al grado de consolidación y las características propias del material. De manera general, las condiciones más vulnerables en términos litológicos corresponden a las rocas con alto grado de fracturamiento y a los depósitos no consolidados. Dentro de este último grupo, la litología predominante y el tamaño de grano que conforman las unidades condiciona la forma en la que se presenta la percolación de los contaminantes, dificultándose más para zonas de tamaño más fino y consolidado, que para sectores de granulometría gruesa a media

que presentan mayor porosidad. La valoración asignada para cada unidad litológica se presenta en la Tabla 49.

Tabla 49. *Ponderadores empleados según el tipo de substrato litológico. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Unidad geológica	Características	Ponderador
Formación Pebas/Solimões	Arcillolitas y lodolitas	0,5
Depósitos aluviales	Limos y arenas	0,6

La profundidad del nivel del agua o techo del acuífero confinado se evaluó a partir de la superficie freática interpolada para toda el área de estudio. Niveles freáticos someros alimentan de manera más directa las reservas subterráneas y la vulnerabilidad aumenta por su cercanía a la fuente de generación de contaminantes. Conforme el nivel freático se profundiza, las cargas contaminantes tienen una mayor probabilidad a ser asimiladas por el suelo o por corrientes superficiales que disminuyen el riesgo de contaminación al acuífero. Para la zona, el valor mínimo de profundidad freática se encuentra en 0,1 y el máximo en aproximadamente 9,9 metros de profundidad medida. En la Tabla 50 se muestra la valoración asignada según la profundidad del nivel freático.

Tabla 50. *Ponderadores empleados según la profundidad del nivel del agua. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Profundidad (m)	Características	Ponderador
< 5	Flujos someros y subsuperficiales	0,9
5 - 20	Flujos ligeramente profundos	0,8

El índice de vulnerabilidad intrínseca, resultado del producto de los 3 parámetros, permite observar que aproximadamente el 5% del área de estudio corresponde a zonas donde la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos es despreciable y el 4% a zonas de vulnerabilidad baja, ambas asociadas a la Formación Pebas/Solimões; el 70% corresponde a zonas de vulnerabilidad moderada y el 21% en zonas de vulnerabilidad alta, las cuales se ubican sobre el acuífero aluvial y donde la mayor vulnerabilidad está asociada a zonas con niveles freáticos someros, Figura 74.

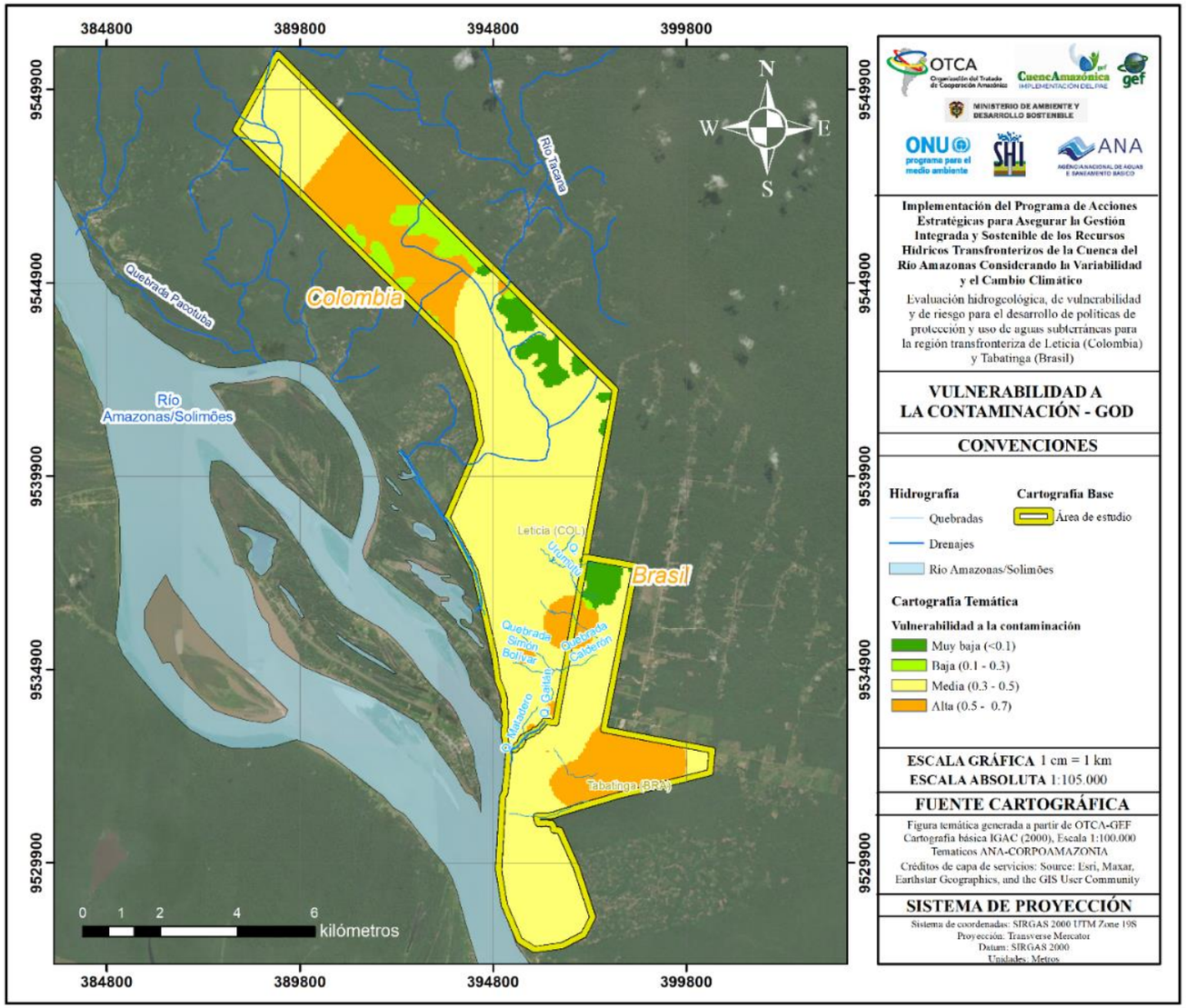


Figura 74. *Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero. Método GOD. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

8.3.2. Método DRASTIC

El método DRASTIC consiste en la combinación de siete parámetros: D, R, A, S, T, I, C, que dependen del clima, suelo, sustrato superficial y subterráneo. A cada parámetro se le asigna un peso cuantitativo que, combinado con las demás variables, obtiene un índice numérico considerado como el grado de vulnerabilidad de los acuíferos, el cual se compone de cinco rangos (**Anexo_00_InformesAntecedentes**). Los parámetros intrínsecos de los acuíferos considerados por el método son: profundidad del nivel freático (D), recarga (R), litología y estructura del medio acuífero (A), tipo de suelo (S), topografía (T), naturaleza de la zona no saturada (I) y la conductividad hidráulica (C).

8.3.2.1. Profundidad del agua subterránea (D)

La profundidad del agua subterránea hace referencia al nivel freático de los acuíferos libres y al techo de los acuíferos confinados; es decir, que consiste en el espesor de la zona no saturada que es atravesado por las aguas de infiltración y pueden traer consigo contaminantes que pueden afectar al acuífero. Sin embargo, si la zona no saturada presenta un espesor significativo existe la posibilidad de atenuación para ciertas cargas contaminantes, ya sea por degradación o retención natural. La valoración de la profundidad del agua subterránea en la zona de estudio se presenta en la Tabla 51, y se destaca que el 80% de la zona de estudio presenta niveles entre los 4,6 y 9,1 metros predominando valores de vulnerabilidad de 7.

Tabla 51. *Valoración de la profundidad del agua subterránea del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Profundidad (m)	Valoración (D_r)
0 – 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5

8.3.2.2.Recarga neta (R)

La recarga neta es el volumen de agua por unidad de área que alimenta al acuífero durante un período de tiempo y resulta de forma primaria de la escorrentía superficial y de la fracción de precipitación después de satisfacer la evapotranspiración. El proceso de recarga puede acarrear la lixiviación y transporte de contaminantes líquidos y sales, por lo que a mayor volumen de recarga (recarga más alta), se considera más vulnerable es el acuífero.

Para su estimación, dado que no se cuenta con informaciones piezométricas suficientes como para calcular el valor con datos de nivel, ni las informaciones cartográficas unificadas necesarias para su estimación por balance de humedades, se optó por utilizar el método de flujo base dado que el estudio anterior realizado por OTCA & SHI SAS (2015) determinó que el acuífero transfronterizo

presenta una dinámica hidrogeológica semejante a la del río Amazonas y de otros drenajes menores, existiendo así una interacción agua superficial – subterránea importante.

Este método solo requiere los registros de caudales del río Amazonas y las precipitaciones de la zona, que luego son ingresadas a un programa del USGS para separar flujos base de los caudales, y se grafican e interpretan los resultados. Este método es, sin embargo, una aproximación al valor de la recarga.

Esta interacción se evidencia en la respuesta de los niveles del acuífero con respecto a los niveles de las corrientes superficiales, ya que responden a la dinámica anual de los niveles del río Amazonas más que al ciclo anual de la precipitación local, como se muestra en un monitoreo mensual entre abril y junio de 2015 de los niveles en 10 pozos y los del río Amazonas, observándose un comportamiento muy similar (Figura 75 y Tabla 52). La influencia de la lluvia en este caso se da más que todo en las cuencas altas del río Amazonas en la zona de Ecuador y Perú (OTCA & SHI SAS, 2015).

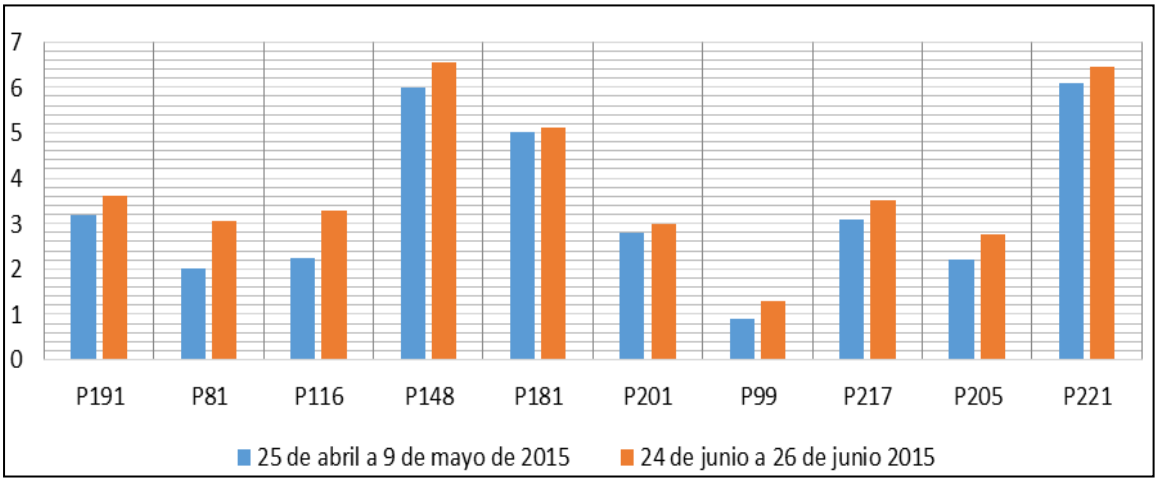


Figura 75. Monitoreo *de niveles estáticos en pozos de agua subterránea en Leticia, abril y junio de 2015. Fuente: OTCA & SHI SAS (2015)*

Tabla 52. *Comparación de desniveles entre abril y junio 2015. Fuente: OTCA & SHI SAS, (2015).*

Desnivel promedio entre abril y junio (m)	
Desnivel en pozos 2015	0,1 -1,0
Desnivel estación Leticia (ciclo anual)	1,1
Desnivel estación Nazareth (ciclo anual)	1,2
Desnivel estación Tabatinga (ciclo anual)	1,1

Debido a la interacción entre las aguas superficiales y las subterráneas, es posible calcular la recarga utilizando el flujo base del río Amazonas que es el cuerpo de agua más importante de la zona. Para calcular el flujo base, se recurre a la metodología propuesta por Cheng et al, (2006), que

implementa un código libre desarrollado por la USGS llamado PART (Rutledge, 1998) el cual extrae la serie de flujo base de una serie de caudales medios diarios.

El código PART funciona bajo el concepto de recesión antecedente, basado en la estimación del tiempo que tiene que transcurrir desde el último evento pico para que el caudal sea completamente flujo base. En los períodos donde existen tanto escorrentía superficial como flujo base, la separación se realiza con una interpolación lineal entre los registros anterior y posterior al evento pico, cuidando de nunca obtener un flujo base mayor al registro real. Este flujo es luego convertido en volumen y, utilizando el área total de la cuenca hasta la zona de estudio, se calculan la recarga y la escorrentía superficial.

Estimación de la recarga

Los caudales del río Amazonas y las precipitaciones de la zona se obtuvieron de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM. Para el caudal, se seleccionó la estación "Nazareth" (Cód. 48017030) que se encuentra aguas arriba de Leticia (Tabla 53, Figura 76). La estimación se realizó para tres escenarios de precipitación: media, baja, y alta. Estos datos se obtuvieron de la estación "Aeropuerto Vásquez Cobo" (Cód. 48015050) de Leticia (Tabla 53, Figura 76), a partir de los cuales se determinaron los años 2008, 2005 y 2009 como los años de precipitaciones medias, bajas y altas respectivamente. Así mismo, se considera que el área de la cuenca del río Amazonas hasta Tabatinga tiene aproximadamente 870.000 km^2.

Tabla 53. *Estaciones hidrometeorológicas seleccionadas para la descarga de los datos de caudal y precipitación. Fuente: IDEAM.*

Código	Nombre Estación	Ubicación	Tipo	Elevación (m.s.n.m.)	Coordenadas UTM Zone 19S	
					Este (m)	Norte (m)
48017030	Nazareth	Leticia, Amazonas (COL)	Limnimétrica	119	384.999,64	9.544.512,18
48015050	Aeropuerto Vásquez Cobo	Leticia, Amazonas (COL)	Sinóptica Principal	84	395.573,31	9.536.381,34

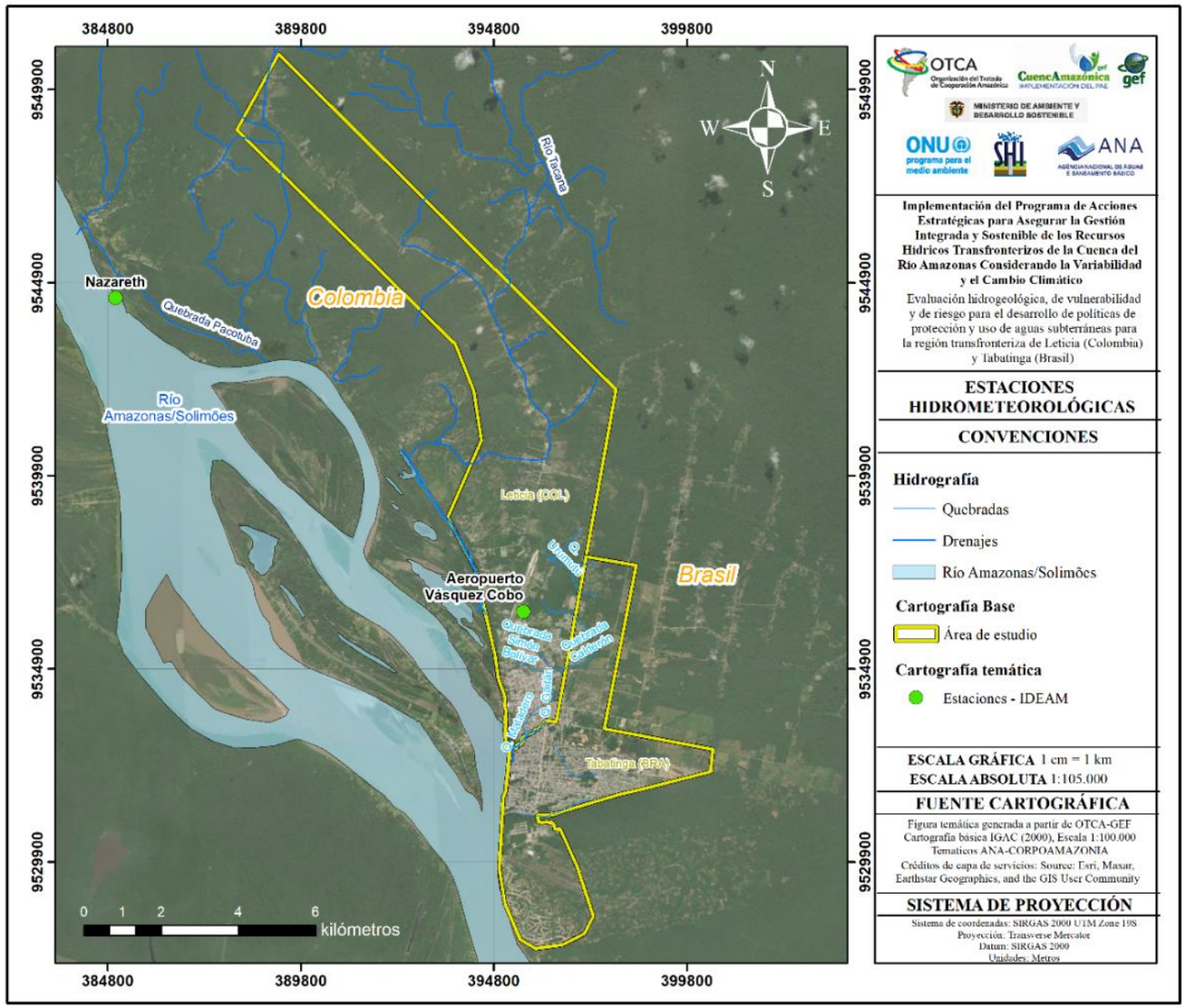


Figura 76. *Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM seleccionadas. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

De la Figura 77 hasta la Figura 79 se presentan las series de caudal medio diario y la separación del flujo base (mediante el código PART) para cada escenario de precipitación. En la Tabla 54 se muestran los resultados de la estimación de la recarga.

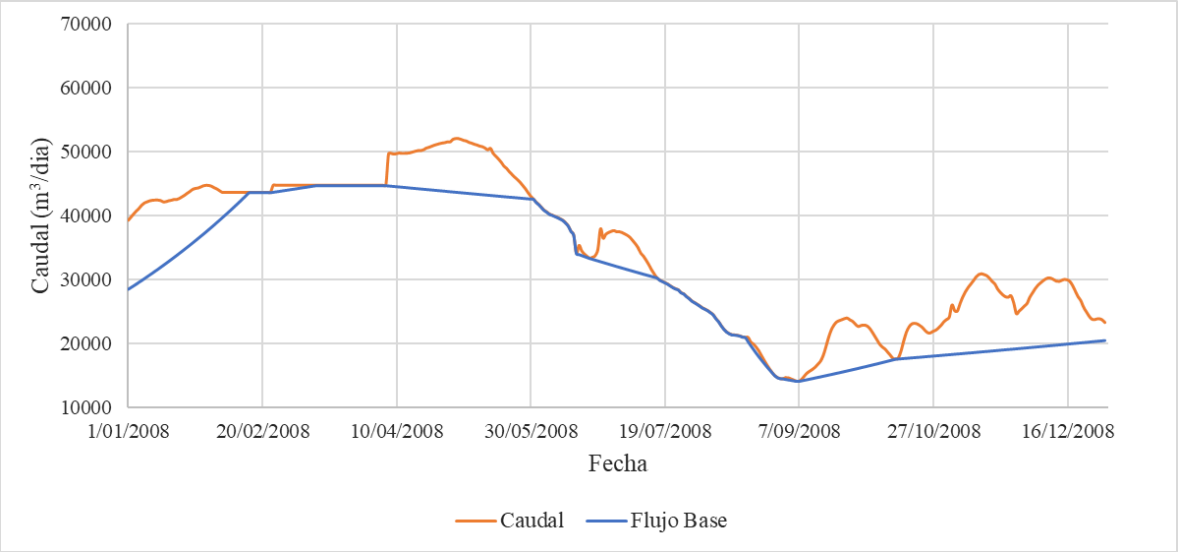


Figura 77. *Separación del flujo base del registro de caudal del río Amazonas en la estación Nazareth para un año de precipitación normal, año 2008. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

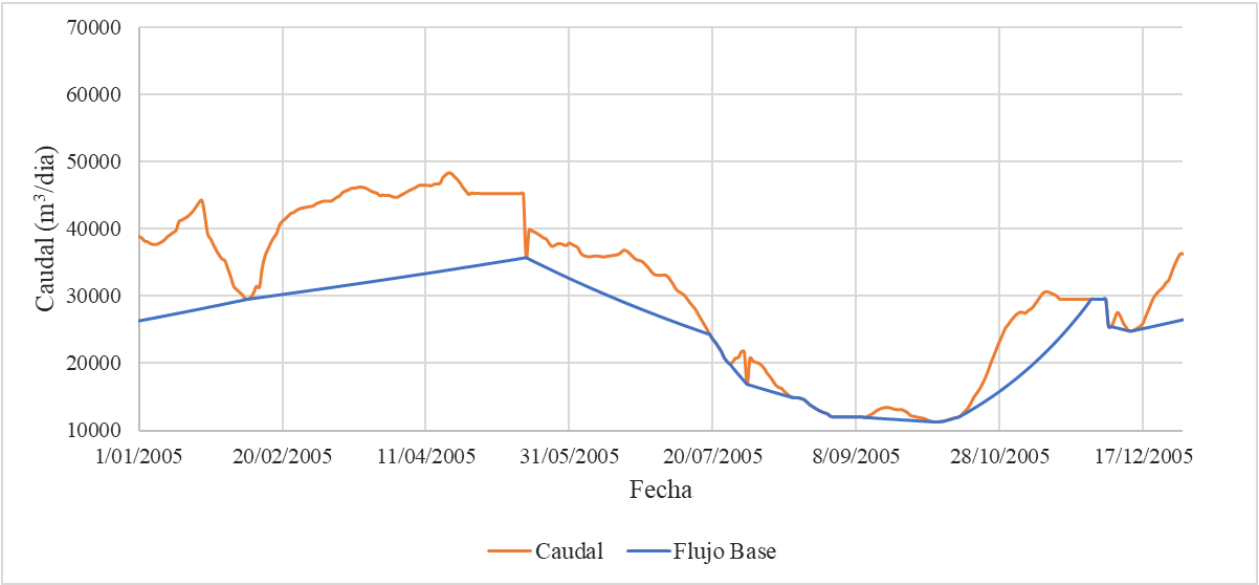


Figura 78. *Separación del flujo base del registro de caudal del río Amazonas en la estación Nazareth para un año de precipitación baja, año 2005. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

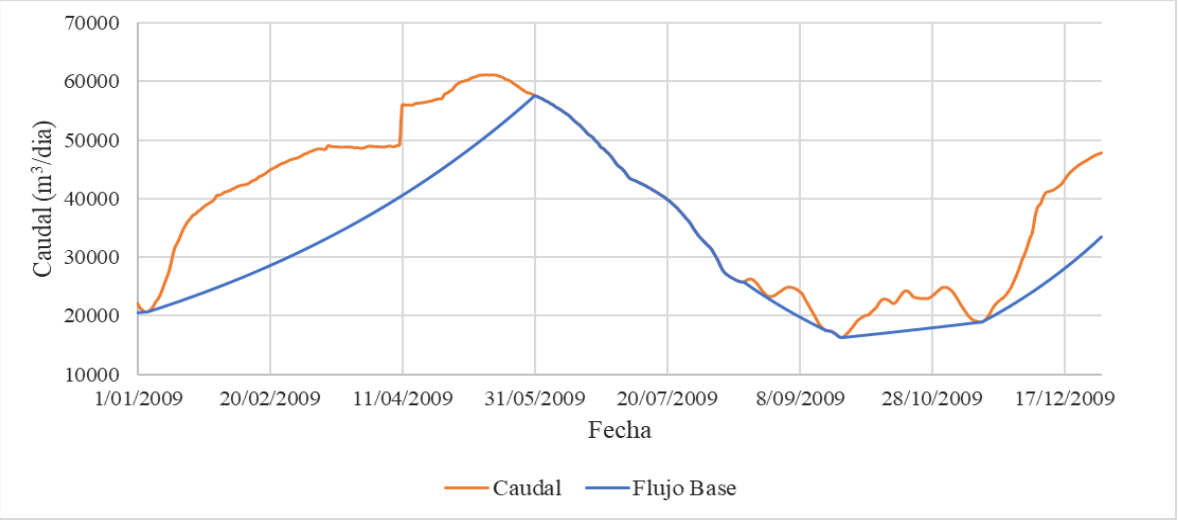


Figura 79. *Separación del flujo base del registro de caudal del río Amazonas en la estación Nazareth para un año de precipitación alta, año 2009. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Tabla 54. *Resultados de estimación de la recarga. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Periodo	Precipitación – P (mm/año)	Escorrentía – E (mm/año)	Recarga – R (mm/año)	E/P (%)	R/P (%)
Precipitación media – 2008	3.377	1.252	1.104	37	33
Precipitación baja – 2005	2.935	1.126	905	38	31
Precipitación alta – 2009	3.915	1.402	1.153	36	29

El flujo base como aproximación a la recarga del acuífero transfronterizo corresponde a aproximadamente del 29% al 33% de la precipitación media anual en la zona, y la escorrentía se encuentra aproximadamente entre el 36 y el 38%. El índice de flujo base (relación entre el caudal base y el caudal medio) varía entre el 80% y el 88%.

Para la valoración de la recarga se toma como dato de referencia la recarga media en mm/año, asignándose un factor Rr de 9, tal como se presenta en la Tabla 55.

Tabla 55. *Valoración de la recarga neta del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Recarga (mm/año)	Valoración (R_r)
Recarga media – 1.104	9

8.3.2.3. Litología y estructura del medio acuífero (A)

Este parámetro consiste en las características litológicas y estructurales del acuífero que definen la capacidad del medio poroso y/o fracturado para dejar trasmitir los contaminantes. El análisis distribuido para esta variable parte de las unidades hidrogeológicas definidas en el presente estudio,

donde predominan niveles acuíferos heterogéneos de arenas y arenas lodosas, valoradas con un factor Ar de 5. En la Tabla 56 se presentan los valores definidos para la litología del acuífero de la zona de estudio.

Tabla 56. *Valoración de la litología del medio acuífero del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Litología del acuífero	Rango de valoración (A_r)	Valor asignado (A_r)
Río Amazonas	1	1
Arcillolitas y lodolitas masivas	1 - 3	2
Arena y arena-lodosa no consolidada	5 - 9	5
Areniscas finas	4 – 9	6

8.3.2.4. Tipo de suelo (S)

Representa al tipo de material que tiene la zona no saturada o vadosa, ya que define la capacidad del suelo para oponerse a la movilización de contaminantes. El suelo se caracteriza por presentar una significativa actividad biológica haciendo que su principal objetivo desde la vulnerabilidad sea la atenuación de la carga contaminante, siendo mayor en suelos con material fino y orgánico. En la Tabla 57 se muestra la valoración de esta variable para los tipos de suelo de la zona de estudio.

Tabla 57. *Valoración del tipo de suelo del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Tipo de suelo	Valoración (S_r)
Agregado arcilloso	7
Franco arenoso	6

8.3.2.5. Topografía (T)

La topografía es un parámetro de evaluación de vulnerabilidad debido a que las pendientes pueden inferir en la escorrentía de contaminantes o por el contrario puede facilitar la infiltración de estos. Las pendientes de la zona oscilan entre 0 y 63%, en predominancia de zonas entre 2 y 6% evaluadas con un factor Tr de 9, seguido de zonas onduladas entre 6 y 12% evaluadas con un factor de 5. En la Tabla 58 se presenta la valoración por el método DRASTIC de cada rango de pendiente.

Tabla 58. *Valoración de la pendiente del terreno del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Pendiente (%)	Valoración (T_r)
0 -2	10
2 - 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

8.3.2.6. Naturaleza de la zona no saturada (I)

Las características de la zona no saturada son de gran importancia a la hora de evaluar la vulnerabilidad, debido a que es la primera defensa natural del acuífero contra los contaminantes y representa la capacidad que tiene el suelo para obstaculizar el transporte vertical. En la Tabla 59 se da la valoración del parámetro I.

Tabla 59. *Valoración de la naturaleza de la zona no saturada del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Naturaleza de la zona no saturada	Valoración (I_r)	Valor (I_r)
Arcilla - lodo	2 - 6	3
Arena con contenido de arcilla significativo	4 - 8	4
Arenisca	4 - 8	6

8.3.2.7. Conductividad hidráulica (C)

Hace referencia a la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, y define la mayor o menor facilidad del medio acuífero para permitir el tránsito del contaminante. Los rangos de valoración utilizados en el parámetro se resumen en la Tabla 60 y corresponden a datos recuperados de la bibliografía con relación a las unidades hidrogeológicas planteadas para el presente estudio (capítulo 4).

Tabla 60. *Valoración de conductividad hidráulica del método DRASTIC en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Unidad hidrogeológica	Conductividad hidráulica (m/día)	Valoración (Cr)
Acuífero libre (HQalTsa)	22,45	3
Acuitardo Solimoes (HTia)	> 4,08	1

Al tener todos los parámetros con el grado de valoración, se les asigna un factor de ponderación *W* a cada uno, dependiendo si el contaminante es un pesticida o no **(Anexo_00_InformesAntecedentes)** dado que los pesticidas suelen ser menos volátiles y más persistentes. Debido a que en la zona de estudio no hay presencia de una intensa actividad agrícola ni de ganadería, se opta por utilizar los factores de ponderación *W* sin pesticidas (Tabla 61).

Tabla 61. *Factores de ponderación del método DRASTIC. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

FACTORES DE PONDERACIÓN							
Tipo de contaminante	**Dw**	**Rw**	**Aw**	**Sw**	**Tw**	**Iw**	**Cw**
Pesticida (DRASTIC-P)	5	4	3	5	3	4	2
No pesticida	5	4	3	2	1	5	3

El índice DRASTIC se obtiene por medio de la siguiente ecuación, en la que se realiza la sumatoria de cada parámetro multiplicado por su factor de ponderación:

$$iV_{DRASTIC} = (D_r * D_W) + (R_r * R_W) + (A_r * A_W) + (S_r * S_W) + (T_r * T_W) + (I_r * I_W) + (C_r * C_W) \quad (2)$$

Los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero se presentan en la Figura 80. La distribución espacial muestra una fuerte tendencia a niveles de vulnerabilidad media cercana al 76% de la zona de estudio, seguido de 23% de zonas con vulnerabilidad alta, condicionada principalmente por los niveles freáticos más someros que coinciden con topografías más planas al oriente de Tabatinga y al noroccidente de la ciudad de Leticia. El 1% restante corresponde a zonas de topografía ondulada y niveles arcillosos del acuífero ubicados al norte del polígono de estudio (vulnerabilidad baja).

Por su parte, al evaluar el factor de ponderación por pesticidas presentado en la Figura 81, la evaluación del factor por topografía y el tipo de suelo condicionan un aumento a zonas de vulnerabilidad alta a lo largo de la zona, en porcentajes similares a rangos moderados.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por ambos métodos empleados, y con el objetivo de no subestimar la vulnerabilidad y ser lo más conservador posible, se puede considerar que el método DRASTIC es la mejor representación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

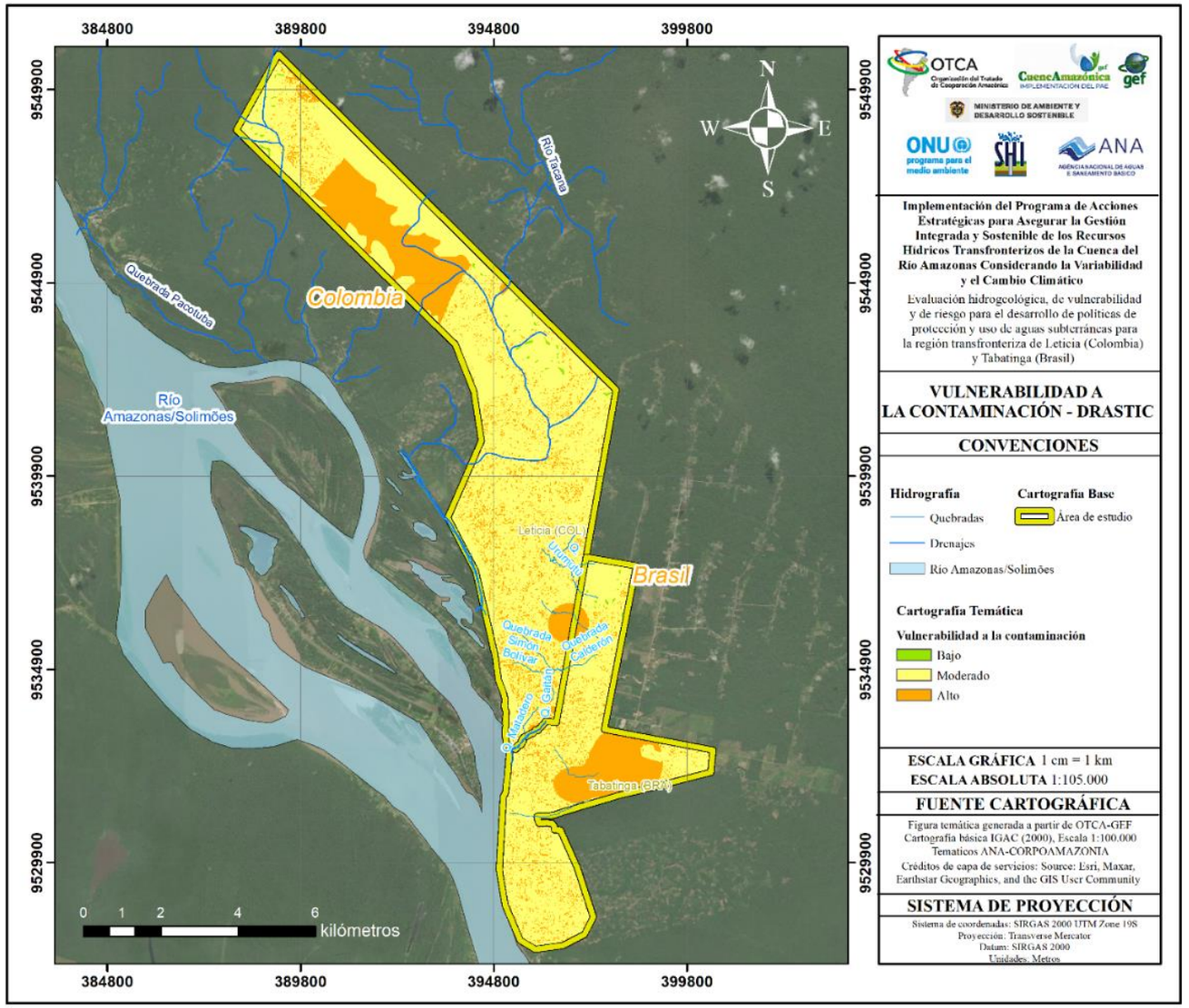


Figura 80. *Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero. DRASTIC. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

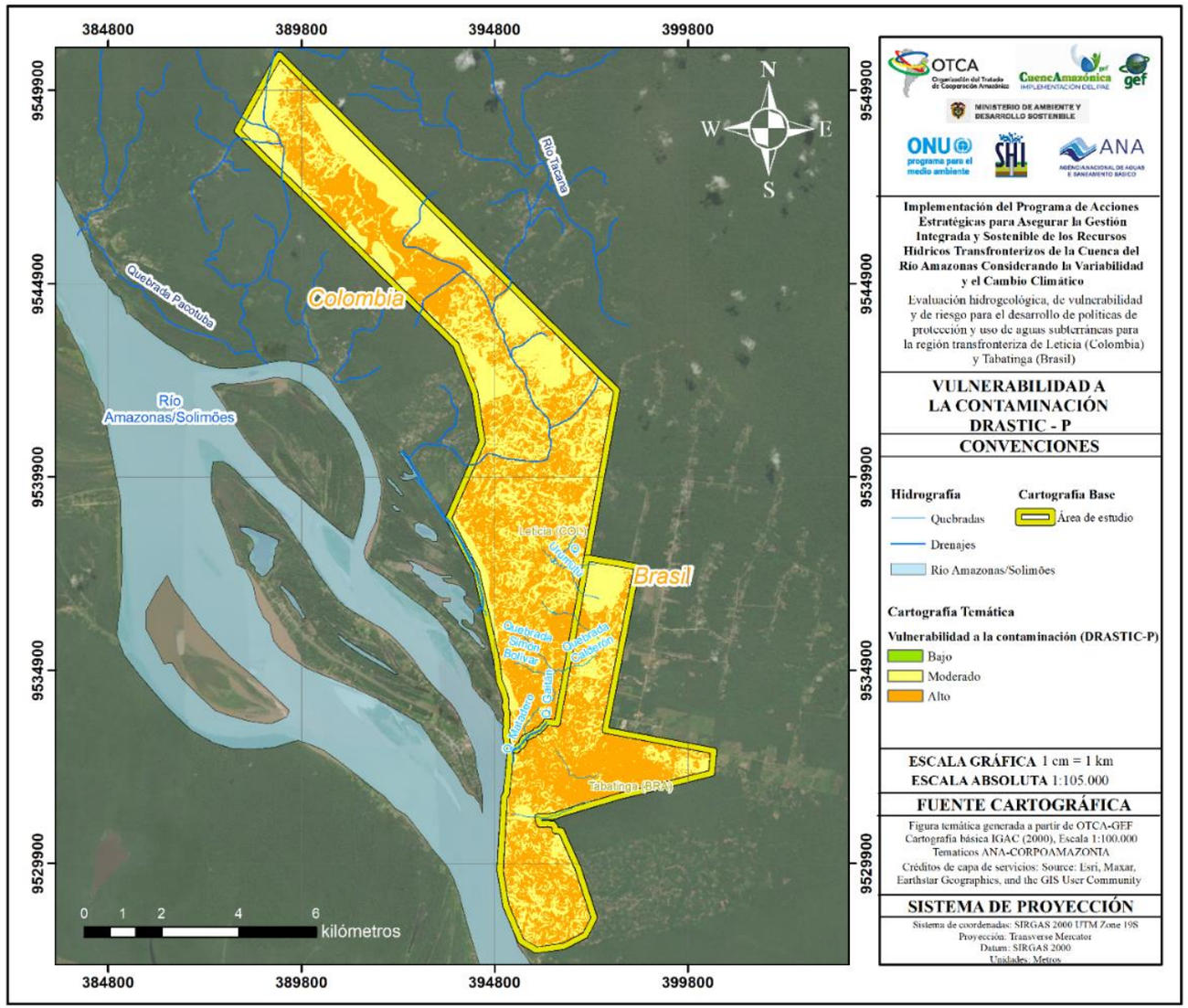


Figura 81. *Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero. DRASTIC - P. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

8.4. Evaluación del peligro de contaminación

El peligro de contaminación de agua subterránea puede definirse como: "la probabilidad de que un acuífero experimente impactos negativos a partir de una actividad antrópica dada hasta un nivel tal que, el agua subterránea se torne inaceptable para consumo humano, de acuerdo con los valores guía de la OMS para calidad del agua potable" Foster et al., (2002). Es necesario aclarar que se emplea la expresión *"peligro"* y no *"riesgo"*, debido a que en varios campos del conocimiento el *"riesgo"* implica la evaluación de los impactos potenciales en la salud humana o animal, a los ecosistemas y el valor económico de los recursos hídricos subterráneos.

Además, se resalta que la palabra peligro es un término empleado a nivel internacional y en Brasil, pero que no está contemplado dentro de la normativa colombiana específicamente. En esta se consideran en todos los campos ambientales, los términos de vulnerabilidad, amenaza (como peligro latente) y riesgo.

El peligro a la contaminación de acuíferos comprende la identificación del posible origen de la contaminación, la probabilidad de que se produzca una liberación del contaminante y la estimación de todos los procesos que pueden conducir a una reducción de la contaminación antes de que este alcance la superficie del agua (Zwahlen, 2003). Para esto, se emplean como insumos la información obtenida en el análisis de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y la clasificación de la carga potencialmente contaminante (amenaza).

Por lo tanto, el peligro de contaminación del acuífero se evalúa mediante la elaboración de una matriz (Tabla 62) que relaciona la carga contaminante con la vulnerabilidad del acuífero.

Tabla 62. *Matriz para evaluar el peligro a la contaminación de los acuíferos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Peligro de contaminación		**Vulnerabilidad a la contaminación**			
		Baja (1)	**Media (2)**	**Alta (3)**	**Muy alta (4)**
Carga potencialmente contaminante	**Nula (0)**	0	0	0	0
	Baja (1)	1	2	3	4
	Moderada (2)	2	4	6	8
	Alta (3)	3	6	9	12

De esta forma, el peligro de contaminación del acuífero se clasifica en:

- Muy elevado: 8-9-12
- Elevado: 4-6
- Moderado: 2-3
- Reducido: 1

Teniendo en cuenta lo anterior, se obtienen dos mapas de peligro, uno calculado a partir de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación mediante el método GOD (capítulo 8.3.1) y el otro calculado a partir del método DRASTIC (capítulo 1.1.1).

En la Figura 82 se puede observar el mapa de peligro de contaminación del acuífero obtenido a partir de la evaluación de las cargas potencialmente contaminantes y la vulnerabilidad intrínseca del acuífero mediante el método GOD. En este se aprecia que, para el área de estudio, aproximadamente el 4,8% se encuentra en zonas donde el peligro de contaminación reducido, asociadas a cargas contaminantes bajas y vulnerabilidades muy bajas y bajas; el 50,7% corresponde a zonas de peligro moderado, que se presenta en regiones con cargas contaminantes bajas y vulnerabilidades medias; el 29,6% en zonas de peligro elevado, donde predominan las cargas contaminantes bajas a medias y vulnerabilidades medias a altas; finalmente, el 14,9% restante corresponde a zonas de peligro muy elevado, ubicadas principalmente al sur de Leticia y en la zona urbana de Tabatinga, donde las cargas contaminantes son altas y la vulnerabilidad a la contaminación varía entre media y alta.

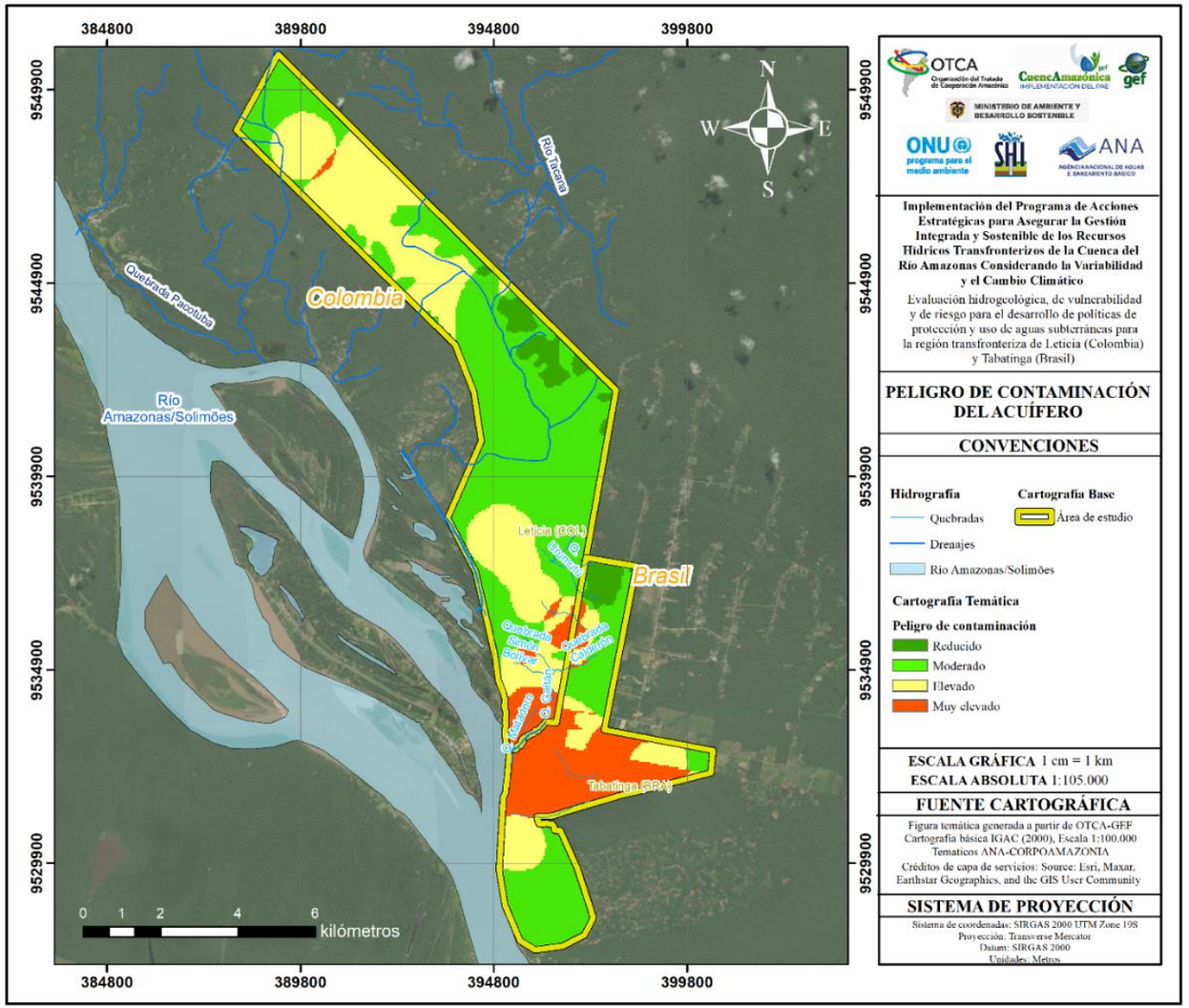


Figura 82. *Peligro de contaminación del acuífero obtenido a partir de la vulnerabilidad intrínseca GOD y la clasificación de las fuentes potenciales de contaminación. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

Por otro lado, al considerar el peligro de contaminación del acuífero obtenido mediante la evaluación de las cargas potenciales de contaminación y la vulnerabilidad del acuífero a partir el método DRASTIC (Figura 83) se puede determinar que el 55,6% corresponde a zonas de peligro moderado, que se presenta en regiones con cargas contaminantes bajas y vulnerabilidades moderadas; el 28,3% en zonas de peligro elevado, en las cuales predominan las cargas contaminantes medias y vulnerabilidades moderadas a altas; y por último, el 16,1% restante corresponde a zonas de peligro muy elevado, ubicadas de manera preferencial al este de la zona urbana de Tabatinga.

Comparativamente, cuando se emplea la vulnerabilidad intrínseca por el método GOD, se evidencian regiones clasificadas como peligro reducido (ubicadas al noreste de la zona de estudio), las cuales no se identifican en el segundo caso, en el que se considera la vulnerabilidad natural por el método DRASTIC. Por su parte, las regiones que corresponden a las zonas de peligro elevado y muy elevado presentan una distribución espacial similar por ambos métodos empleados (excepto por pequeños puntos al noroeste de la zona y alrededor de las ciudades estudiadas), como se observa en las Figura 82 y Figura 83.

Es posible entonces concluir que, de los dos métodos empleados, el más conservador y que puede representar mejor las condiciones reales de la zona de estudio, es el obtenido a partir de la vulnerabilidad intrínseca DRASTIC y la clasificación de las fuentes potenciales de contaminación. Sin embargo, ambos métodos permiten validar las zonas de mayor vulnerabilidad, al presentar resultados similares

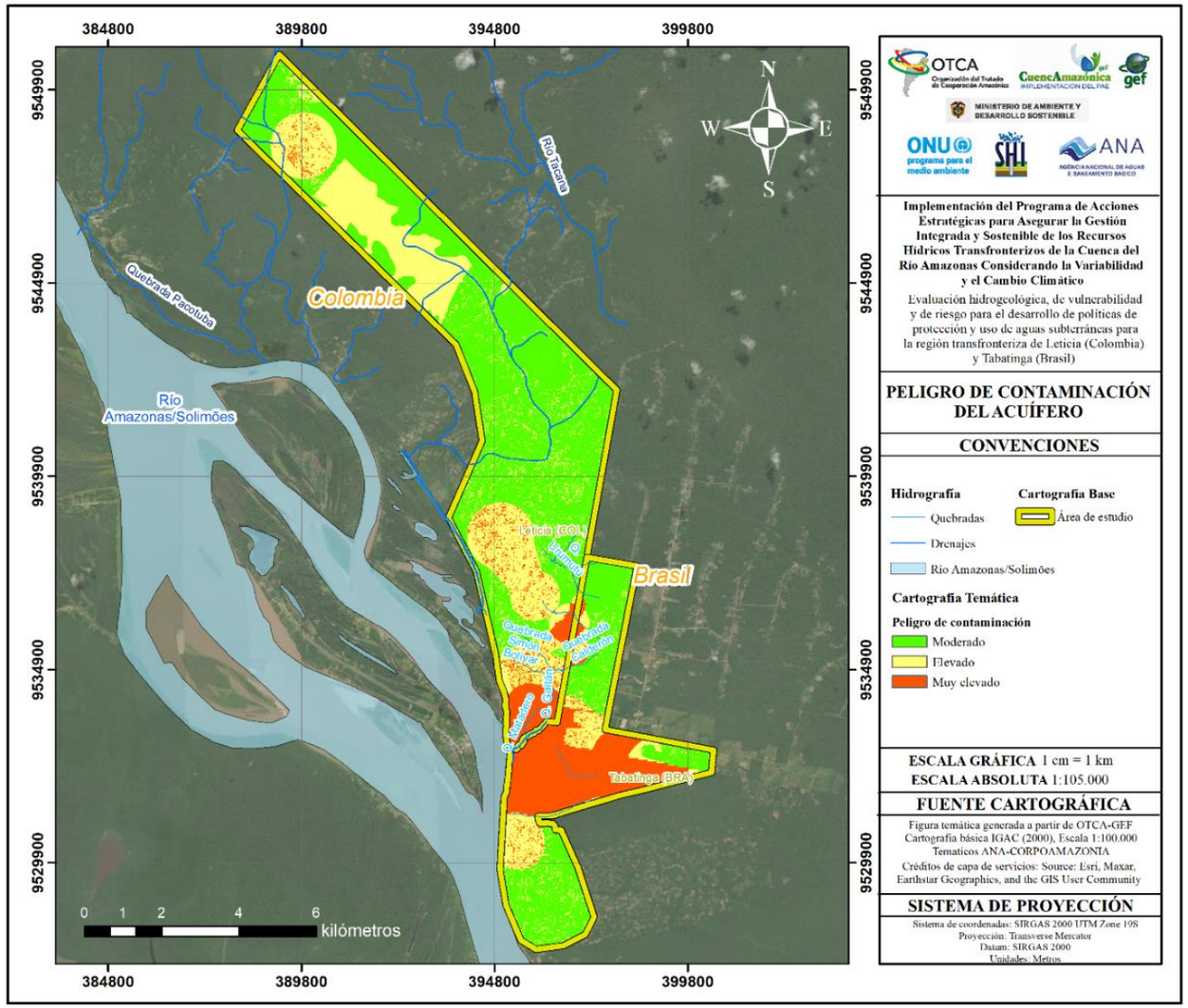


Figura 83. *Peligro de contaminación del acuífero obtenido a partir de la vulnerabilidad intrínseca DRASTIC y la clasificación de las fuentes potenciales de contaminación*

Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).

8.5. Estrategias para minimizar los peligros de contaminación identificados

Como se mencionó anteriormente, el peligro o riesgo de contaminación del acuífero es determinado a partir de las cargas potencialmente contaminantes y de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero a la contaminación. Debido a que la vulnerabilidad del acuífero depende de las características naturales del medio, las estrategias para minimizar los riesgos o peligros de contaminación del acuífero se centran en reducir la carga potencialmente contaminante resultado de actividades humanas.

Una de las mejores estrategias que se pueden implementar para prevenir y reducir la contaminación del acuífero es a través de una planeación adecuada del uso del suelo. Para esto se puede emplear el mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero como una forma para establecer áreas que deben ser protegidas y, por lo tanto, restringir el uso del suelo y ciertas actividades en aquellas zonas clasificadas como altamente vulnerables. Entre las actividades que pueden ser restringidas se encuentran:

- El uso y almacenamiento de fertilizantes y pesticidas.
- Almacenamiento de combustibles como Diesel y JET-A1.
- Vertederos o rellenos sanitarios para la disposición de residuos sólidos.
- Actividades que interfieran con el flujo normal del agua subterránea, como canteras.
- La descarga de efluentes de aguas residuales domésticas e industriales sin tratar en cuerpos de agua superficial y en el subsuelo.

A su vez, y de forma complementaria, se pueden establecer perímetros de protección para captaciones prioritarias; es decir, restringir el uso del suelo que circunda las captaciones empleadas para consumo humano o aquellas áreas en las que se concentran el mayor número de pozos. Para determinar los perímetros de protección se pueden emplear valores arbitrarios asumidos por parte de las entidades regulatorias o métodos analíticos basados en diferentes criterios como distancia horizontal, tiempo de flujo horizontal, porcentaje del área de recarga, capacidad de dilución y/o atenuación de la zona saturada, de los cuales el método más preciso corresponde a modelos matemáticos basados en un modelo del flujo del agua subterránea y del transporte del contaminante. Independiente del método empleado, el grado de restricción se hace menor a medida que aumenta la distancia desde el punto de captación. Inicialmente se pueden definir 2 zonas:

- **Zona de protección interna**: corresponde al área más cercana al pozo y que debe contar con las regulaciones más estrictas. Las actividades que presenten un alto riesgo de contaminación, como el almacenamiento de hidrocarburos o el vertimiento de aguas residuales, deben prohibirse o controlarse estrictamente dentro de esta zona.
- **Zona de protección exterior**: está destinada a proteger contra fuentes de contaminación menos inmediatas, pero aún potenciales.

Por otra parte, se debe fomentar la adopción de medidas de control de la contaminación para actividades que tengan el potencial de modificar la calidad de las aguas subterráneas y la autoridad

ambiental competente debe verificar regularmente que se cumplan con los planes de manejo ambiental.

En el caso de las plantas termoeléctricas o estaciones de servicio, lo ideal es llevar a cabo prácticas adecuadas de almacenamiento y manejo del combustible Diesel u otros, así como capacitar a los empleados sobre los procedimientos adecuados para el manejo de estas sustancias, incluida la respuesta y contención de derrames. Se debe inspeccionar y realizar un mantenimiento periódico a los equipos, tanques de almacenamiento, tuberías y otra infraestructura para detectar y reparar cualquier fuga de inmediato y, de ser posible, implementar sistemas de detección de fugas, como sensores o equipos de monitoreo y, así, evitar la migración de combustible. Además, este tipo de instalaciones debe contar con sistemas apropiados de tratamiento de aguas residuales, que permitan una gestión adecuada del agua contaminada generada por la operación de la planta termoeléctrica o actividades como la limpieza de equipos o del área de almacenamiento de combustible.

En el caso de los rellenos sanitarios o vertederos, estos deben contar con una base impermeable para evitar que los lixiviados se infiltren y lleguen al acuífero; además, los lixiviados deben ser recolectados y tratados a través de procesos biológicos, físicos o químicos antes de ser descargados en algún cuerpo de agua; también se podría implementar un sistema de cobertura del vertedero, el cual debe contar con un diseño y mantenimiento adecuado, y se debe gestionar adecuadamente las aguas pluviales con el objetivo de minimizar la infiltración de precipitaciones en el vertedero y con esto minimizar la formación de lixiviados. Finalmente, deben contar con un sistema de recolección y monitoreo de gas de vertedero, el cual puede migrar a través del suelo y afectar potencialmente la calidad del agua subterránea.

Además, la implementación de sistemas apropiados de gestión de aguas residuales es crucial para proteger la calidad del agua subterránea. Se debe promover el uso de pozos sépticos u otros sistemas de saneamiento *in situ* que estén diseñados, instalados y mantenidos adecuadamente; los tanques que contengan los lodos deben ser impermeables y estar debidamente mantenidos y, por lo tanto, requieren una inspección periódica, que puede ser realizada con mayor facilidad inmediatamente después del vaciado. A su vez, la eliminación regular de lodos y la disposición adecuada de aguas residuales es esencial para evitar la contaminación de las aguas subterráneas. Las autoridades ambientales competentes deben elaborar un inventario detallado de la localización y características de los sistemas de saneamiento *in situ* con el objetivo de priorizar aquellas instalaciones que se encuentren abandonadas o en mal estado y que requieran implementar medidas de control inmediatas para evitar la generación o proliferación de focos de contaminación. El sellado adecuado de los pozos abandonados también es esencial para proteger las fuentes de agua subterránea.

Dado que la red de alcantarillado del municipio de Leticia es antigua (más de 40 años) y puede presentar fallas técnicas, y que en general en Leticia y Tabatinga la cobertura del sistema de alcantarillado es deficiente, las empresas prestadoras del servicio (USPDL y COSAMA) tienen la responsabilidad de identificar los puntos más críticos en los cuales se producen filtraciones regulares de aguas residuales y subsanarlos, así como realizar mantenimientos preventivos periódicamente, que permitan identificar pequeñas fisuras o fugas en las tuberías y de esa forma

evitar problemas sanitarios. En la medida de lo posible, se debe instalar un sistema de recolección y tratamiento de las aguas residuales para evitar los vertimientos descontrolados al suelo y a cuerpos de agua, tanto en Leticia como en Tabatinga.

Por su parte, las captaciones de agua subterránea que se construyan en adelante deben ser construidas por profesionales capacitados siguiendo las pautas establecidas que permitan garantizar que las captaciones subterráneas no se conviertan en una fuente de contaminación futura o suponen un riesgo para la salud del usuario y sus vecinos; esto incluye la descripción detallada de los núcleos de perforación y la correcta ubicación de los sellos y rejillas dentro del pozo, de forma que se pueda conocer las características de las unidades hidrogeológicas y la profundidad a la que se realiza la captación, así como determinar de manera preliminar la fuente de contaminación. Además, esta infraestructura debe contar con medidas de protección que eviten el ingreso directo de los contaminantes (como tapa de seguridad, cerco alrededor del punto, sello sanitario, etc), además se deben controlar las actividades que se realizan alrededor de estas captaciones y que puedan amenazar la calidad de las aguas subterráneas, y realizar mantenimientos regulares a los pozos.

Es importante que los usuarios se ocupen de registrar o regularizar sus pozos con los organismos competentes (organismo de gestión hídrica y/o ambiental). Además, al solicitar el otorgamiento definitivo del derecho de uso del recurso hídrico, deberá proporcionar toda la información técnica disponible del pozo, como su diseño, características constructivas e información del uso y usuarios, a fin de que estos organismos cuenten con información sobre la demanda y calidad de las aguas y puedan velar por su protección. Corresponde a los organismos competentes en materia ambiental, de recursos hídricos y de salud pública del Estado y municipio verificar el cumplimiento de las condiciones de las licencias emitidas.

Finalmente, se debe involucrar a la comunidad local en los procesos de toma de decisiones y fomentar su participación en las iniciativas de protección de las aguas subterráneas, fomentando un sentido de propiedad y responsabilidad para proteger los recursos hídricos. Esto incluye instruir a los propietarios de los pozos y otras partes interesadas sobre cómo sus acciones afectan la calidad y cantidad del agua subterránea, proporcionar información sobre los riesgos potenciales para la salud relacionados con la calidad del agua, determinar las acciones que las personas de la comunidad pueden implementar para mantener la calidad del agua subterránea, tales como:

- *Gestión Responsable de Residuos Sólidos*: Es crucial llevar a cabo una gestión adecuada de los residuos sólidos, diferenciando entre los peligrosos y no peligrosos, y depositándolos en los lugares designados para este propósito. Esto debe cumplir rigurosamente con las regulaciones ambientales vigentes en cada país.
- *Supervisión y Control de los sistemas de tratamiento de vertimiento in situ*: Las autoridades competentes deben monitorear los sistemas sépticos para prevenir la contaminación del agua subterránea.
- *Preservación de Cuerpos de Agua Superficiales*: Para proteger los cuerpos de agua superficiales, es esencial cumplir de manera estricta con las restricciones ambientales a lo largo de su curso.

- *Fomento de Prácticas Agrícolas Sostenibles*: Se debe promover el uso de prácticas agrícolas sostenibles que reduzcan al mínimo la utilización de pesticidas y fertilizantes, minimizando así el impacto en la calidad del agua subterránea.
- *Prevención de vertimiento de aguas residuales no tratadas u otras sustancias peligrosas al suelo*: Evitar descargas de aguas residuales domésticas no tratadas y sustancias peligrosas en el suelo y en los cuerpos de agua, preservando así la calidad del agua subterránea y superficial.
- *Participación Comunitaria en el Cuidado del Agua*: Establecer comités dedicados al cuidado del agua, compuestos por miembros de la comunidad, es fundamental para involucrar a todos los interesados en la protección y conservación del recurso hídrico.
- *Sellado Adecuado de Pozos en Desuso*: Después de la descontaminación, los pozos abandonados o altamente contaminados deben sellarse de manera adecuada y siguiendo los procedimientos adecuados para evitar riegos.
- *Empresas o Profesionales cualificados en Perforación de Pozos*: Al perforar pozos tubulares, se debe contar con empresas o profesionales cualificados, y con licencia para realizar esta actividad.
- *Análisis Anuales de la Calidad del Agua*: Realizar análisis anuales de la calidad del agua del pozo o cuando se produzcan cambios significativos en sus características físicas.
- *Mantenimiento Regular de Pozos*: Programar un mantenimiento periódico de los pozos cada 5 años es esencial para garantizar su buen funcionamiento y la calidad del agua que proporcionan.

Para generar interés en este tema, se pueden hacer en sus reuniones, talleres y capacitaciones locales, ante juntas de acción comunales, escuelas e instituciones de educación superior.

9. ACTUALIZACIÓN DE LA LÍNEA BASE DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y NIVELES DEL AGUA SUBTERRÁNEA

9.1. Campaña de monitoreo del acuífero binacional

La actualización de la línea base de calidad de agua subterránea en la zona de estudio definida para este proyecto se obtuvo a partir de la definición de una red de monitoreo preliminar para realizar una campaña de monitoreo de calidad y cantidad del acuífero binacional, en 60 puntos representativos del sistema acuífero binacional, distribuidos en 35 en Leticia y 25 en Tabatinga, con los siguientes parámetros: temperatura, color, turbidez, pH, Eh, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), alcalinidad total y dureza. Cationes principales (Na^+, K^+, Ca_2^+, Mg_2^+), aniones principales (Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^-) componentes químicos secundarios, que incluye hierro (Fe) y manganeso (Mn), componentes de la serie nitrogenada (NO_2^- e NO_3^-) y los análisis microbiológicos de coliformes termotolerantes, totales y E-Coli.

El muestreo se realizó por parte del personal de SHI S.A.S (acreditados por IDEAM para la toma de muestras de agua subterránea- Resolución N° 0199 de 09 marzo 2021) y los análisis de laboratorio se llevaron a cabo en las instalaciones SGS Colombia en Bogotá, laboratorios acreditados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM para la realización de dichos análisis bajo estándares nacionales e internacionales de calidad. El análisis e interpretación de los resultados se llevó a cabo por parte SHI S.A.S.

9.2. Red de monitoreo preliminar (60 puntos)

A continuación, se presentan los puntos de agua subterránea que definen la red preliminar sobre la cual se ejecutaron los análisis (Tabla 63 y Figura 84). Los detalles del monitoreo, la metodología y el desarrollo del trabajo de campo y laboratorio se presenta en el capítulo de metodología (**Anexo_00_InformesAntecedentes**).

Tabla 63. *Coordenadas de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Número	Nombre	Localización	Coordenadas – UTM Zone 19S		Cota (m.s.n.m)
			Este	Norte	
1	PZ-DM-001	Leticia	396.201,51	9.534.475,07	74,00
2	PZ-DM-002	Leticia	395.834,51	9.533.326,43	70,21
3	PZ-DM-003	Leticia	396.088,87	9.533.790,75	78,05
4	PZ-DM-005	Leticia	389.032,20	9.549.482,93	82,72
5	PZ-DM-006	Leticia	391.438,21	9.546.844,92	80,66
6	PZ-DM-007	Leticia	396.643,61	9.536.065,55	77,70
7	PZ-NM-001	Leticia	390.481,13	9.547.795,73	94,00
8	PZ-NM-002	Leticia	394.223,62	9.538.341,98	87,00
9	PZ-NM-003	Leticia	393.963,01	9.538.652,43	77,49

Número	Nombre	Localización	Coordenadas – UTM Zone 19S		Cota (m.s.n.m)
			Este	Norte	
10	PZ-NM-005	Leticia	394.966,52	9.535.916,89	78,00
11	PZ-NM-006	Leticia	395.400,38	9.534.074,90	71,00
12	PZ-NM-007	Leticia	395.307,30	9.534.566,12	87,00
13	PZ-NM-008	Leticia	395.400,76	9.533.767,81	61,00
14	PZ-NM-009	Leticia	396.030,08	9.533.548,01	78,36
15	PZ-NM-011	Leticia	395.341,27	9.533.758,46	76,89
16	PZ-NM-012	Leticia	395.397,52	9.534.212,52	77,85
17	PZ-NM-013	Leticia	395.786,08	9.546.788,71	60,00
18	PZ-NM-014	Leticia	395.640,24	9.533.767,01	77,62
19	PZ-NM-015	Leticia	394.892,01	9.536.734,00	78,96
20	PZ-NM-016	Leticia	394.920,08	9.536.641,56	78,78
21	PZ-NM-019	Leticia	395.308,19	9.534.104,59	78,43
22	PZ-NM-020	Tabatinga	396.050,94	9.531.496,16	98,00
23	PZ-NM-021	Leticia	388.790,93	9.549.402,93	83,89
24	PZ-NM-022	Leticia	392.365,92	9.545.992,69	79,17
25	PZ-NM-023	Leticia	392.268,57	9.546.012,93	78,88
26	PZ-NM-024	Leticia	394.600,65	9.536.729,70	78,04
27	PZ-NM-025	Leticia	395.622,02	9.534.365,05	78,24
28	PZ-NM-026	Leticia	396.327,08	9.533.869,37	77,93
29	PZ-NM-027	Leticia	396.773,65	9.536.610,61	78,30
30	PZ-NM-028	Leticia	395.630,20	9.535.247,85	78,26
31	PZ-NM-029	Leticia	395.646,77	9.534.290,15	70,00
32	PZ-NM-030	Leticia	393.104,64	9.545.667,00	81,00
33	PZ-NM-031	Leticia	394.834,10	9.544.542,67	80,67
34	PZ-NM-032	Leticia	395.056,34	9.544.690,64	80,01
35	PZ-NM-033	Tabatinga	395.820,96	9.533.076,92	77,61
36	PZ-NM-034	Tabatinga	395.801,95	9.533.158,59	78,50
37	PZ-NM-036	Tabatinga	395.881,06	9.533.138,13	78,42
38	PZ-NM-037	Tabatinga	395.587,09	9.531.236,08	76,44
39	PZ-NM-038	Tabatinga	395.565,04	9.531.225,06	76,71
40	PZ-NM-039	Tabatinga	395.848,68	9.533.212,97	76,83
41	PZ-NM-040	Tabatinga	396.233,66	9.533.369,60	89,00
42	PZ-NM-042	Tabatinga	395.432,81	9.532.754,46	64,00
43	PZ-NM-044	Tabatinga	395.463,57	9.532.815,92	96,00
44	PZ-NM-045	Tabatinga	395.767,83	9.533.101,09	77,78
45	PZ-NM-047	Leticia	388.620,47	9.549.265,34	82,18

Número	Nombre	Localización	Coordenadas – UTM Zone 19S		Cota (m.s.n.m)
			Este	Norte	
46	PZ-NM-048	Leticia	388.337,55	9.549.011,76	81,92
47	PZ-NM-049	Tabatinga	397.927,01	9.532.582,12	78,43
48	PZ-NM-050	Tabatinga	397.930,25	9.532.603,91	88,00
49	PZ-NM-051	Tabatinga	396.225,55	9.532.821,21	78,26
50	PZ-NM-052	Tabatinga	395.965,28	9.533.259,21	76,11
51	PZ-NM-053	Tabatinga	396.573,46	9.532.817,26	87,00
52	PZ-NM-054	Tabatinga	396.542,63	9.532.817,22	81,00
53	PZ-NM-055	Tabatinga	396.229,90	9.532.870,61	77,98
54	PZ-NM-056	Tabatinga	396.252,25	9.532.869,15	77,98
55	PZ-NM-057	Tabatinga	398.115,34	9.532.512,01	71,00
56	PZ-NM-058	Tabatinga	396.944,09	9.532.264,95	57,00
57	PZ-NM-059	Tabatinga	396.296,76	9.532.172,04	63,00
58	PZ-NM-060	Tabatinga	395.864,70	9.532.540,03	69,00
59	PZ-NM-061	Tabatinga	396.719,22	9.531.963,16	77,46
60	PZ-NM-062	Tabatinga	395.863,88	9.533.246,57	69,00

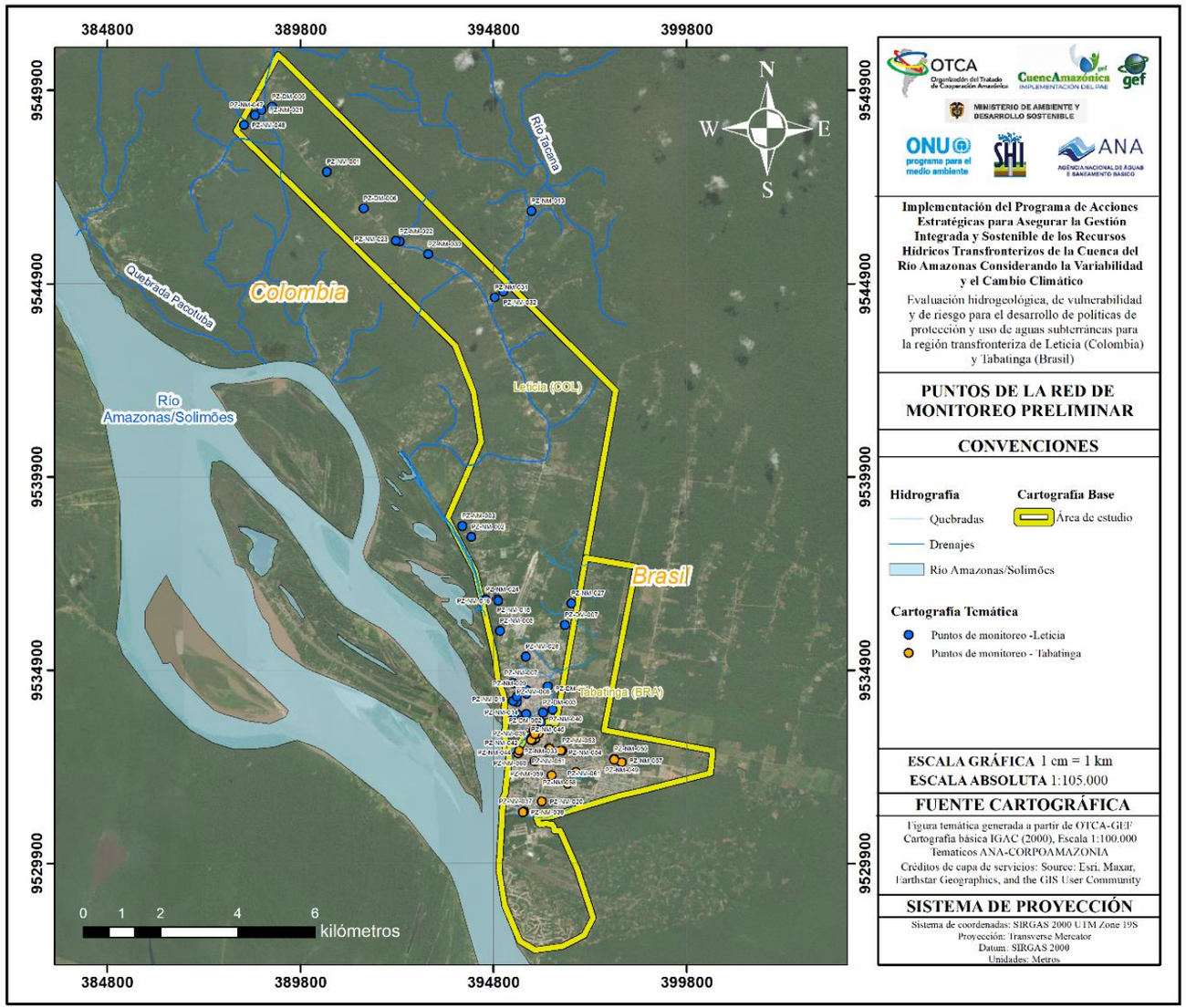


Figura 84. *Distribución de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

9.3. Definición de la red de monitoreo preliminar

El diseño de la red de monitoreo de la calidad y cantidad del agua subterránea se define como la selección de los sitios y la frecuencia de muestreo para determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua subterránea. El objetivo principal del monitoreo es determinar las tendencias generales a corto y largo plazo de la fluctuación en el nivel y en la calidad del agua subterránea en la zona de estudio, así como determinar las concentraciones de determinados contaminantes y establecer medidas de manejo que propendan por la protección del acuífero y reduzcan los impactos potenciales en la salud humana.

Para definir la ubicación y la cantidad de los sitios de monitoreo, se tuvo en cuenta que:

- El monitoreo debe estar integrado por un número suficiente de puntos para caracterizar adecuadamente toda el área de estudio, de forma que se tenga en cuenta la variación espacial de variables hidrogeológicas como conductividad hidráulica y porosidad.
- Los puntos de monitoreo deben abarcar todas las unidades hidrogeológicas de interés; en este caso el muestreo se realiza sobre el acuífero aluvial, lo que además permite asegurar la comparabilidad de la información.
- Se priorizan las zonas de mayor vulnerabilidad y con mayor peligro de contaminación, así como las zonas donde se concentran el mayor número de captaciones para uso doméstico.
- Según la dirección de flujo del agua subterránea y la localización de las fuentes puntuales de contaminación, al menos un punto debe estar ubicado “aguas arriba” de las fuentes potenciales de contaminación de forma que reflejen las condiciones iniciales de calidad del agua, mientras que la mayoría se deben ubicar en las inmediaciones de la fuente de contaminación o “aguas abajo”.
- La selección de los puntos se realiza a partir de la localización de las captaciones existentes que cuenten con una infraestructura adecuada (como sello sanitario, tapa de seguridad, piso de cemento alrededor del punto).
- Deben ser puntos que sean accesibles a lo largo del tiempo y que permitan la trazabilidad de la calidad del agua subterránea.
- Se incluyen puntos cercanos a los lugares donde, en estudios anteriores, se han registrado descensos en el nivel freático o altas concentraciones de contaminantes biológicos.
- Deben estar distribuidos espacialmente de forma que se puedan identificar fuentes nuevas de contaminación, especialmente en aquellos lugares que cuentan con poca información.
- Se tiene en cuenta el personal disponible y las limitaciones presentadas en campo (condiciones de seguridad y orden público en la zona).

Sin embargo, es importante resaltar que el diseño inicial de esta red, que se usó para hacer el muestreo hidroquímico, fue revisada, modificada y actualizada, de acuerdo con los resultados obtenidos en el monitoreo para posteriormente, proponer una red de monitoreo y la mejor estrategia para su implementación en el tiempo, como una herramienta de gestión del recurso hídricos para la zona de este estudio.

9.4. Medición de niveles de agua subterránea

Con el inventario de puntos de agua subterránea y el monitoreo fisicoquímico de la red preliminar, se busca actualizar la piezometría del área de estudio, en relación con el uso constante del recurso y su cambio a lo largo del tiempo. Aunque en campo no fue posible medir el nivel de agua en los 60 pozos como lo esperado, se obtuvo una buena distribución espacial de las mediciones con los puntos donde se logró medir el nivel y se obtuvo buena interpolación de la superficie potenciométrica para la construcción del mapa piezométrico.

A continuación, se presentan los resultados de la nivelación topográfica de 41 puntos de los 60 que conforman la red de monitoreo de calidad de agua para el acuífero binacional y el mapa de localización de los pozos donde fue posible medir el nivel.

9.4.1. Georreferenciación de los puntos que conforman la red de monitoreo

Antes de iniciar el levantamiento de los puntos de control en campo, se selecciona el punto de amarre a la red geodésica. Como se mencionó previamente, para este caso el amarre se hizo al mojón IBGE-92555 de la red del IGAC, el cual se encuentra en Tabatinga y cuyas características se muestran en la Tabla 64.

Tabla 64. *Información geográfica del mojón disponible en la red geodésica del IGAC (coordenadas convertidas a época 2022.10). Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Mojón	Coordenadas – UTM Zone 19S		Altura elipsoidal [m]
	Este (λ)	Norte (φ)	
IBGE-92555	396.344,51	9.533.491,86	96,66

A partir de la selección del punto de amarre, se obtienen las coordenadas de puntos de interés dentro del área de cobertura de la señal de radio. Algunos de ellos son reutilizados como puntos base en levantamientos de sectores más distales a la estación del IGAC, mientras en otros casos se levantan puntos adicionales que son usados como bases alternas, de forma que permitan alcanzar sectores donde originalmente la cobertura de radio no lo permitiría. En la Foto 23 se muestra el mojón IBGE-92555 y el armado de la Base sobre dicho punto de control.



Foto 23. *Mojón IBGE-92555 e instalación del receptor base. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Inicializada la base principal y las bases alternativas, se procede al levantamiento de los puntos donde se localizan los pozos en los cuales se realizó la medición de nivel, procurando la mayor cercanía al punto exacto. En sectores donde la cobertura arbórea o de estructuras antrópicas impidiera la correcta adquisición de datos de los satélites o la señal de radio en el receptor móvil, se realiza la medición en sitios adyacentes que conservaran la misma altura del nivel base de los pozos. Los puntos demarcados conservan la codificación original de los levantamientos previos.



Foto 24. *Levantamiento de puntos con el receptor móvil. Izquierda: sitio colindante al pozo sobre el que se realizó medición de nivel; derecha: lugar alterno para medición del nivel base del terreno en pozo ubicado al interior de una edificación. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Una vez levantados todos los puntos de interés en campo se realiza la consolidación de los valores obtenidos, contenida en la Tabla 1 y esquematizados en la Figura 85.

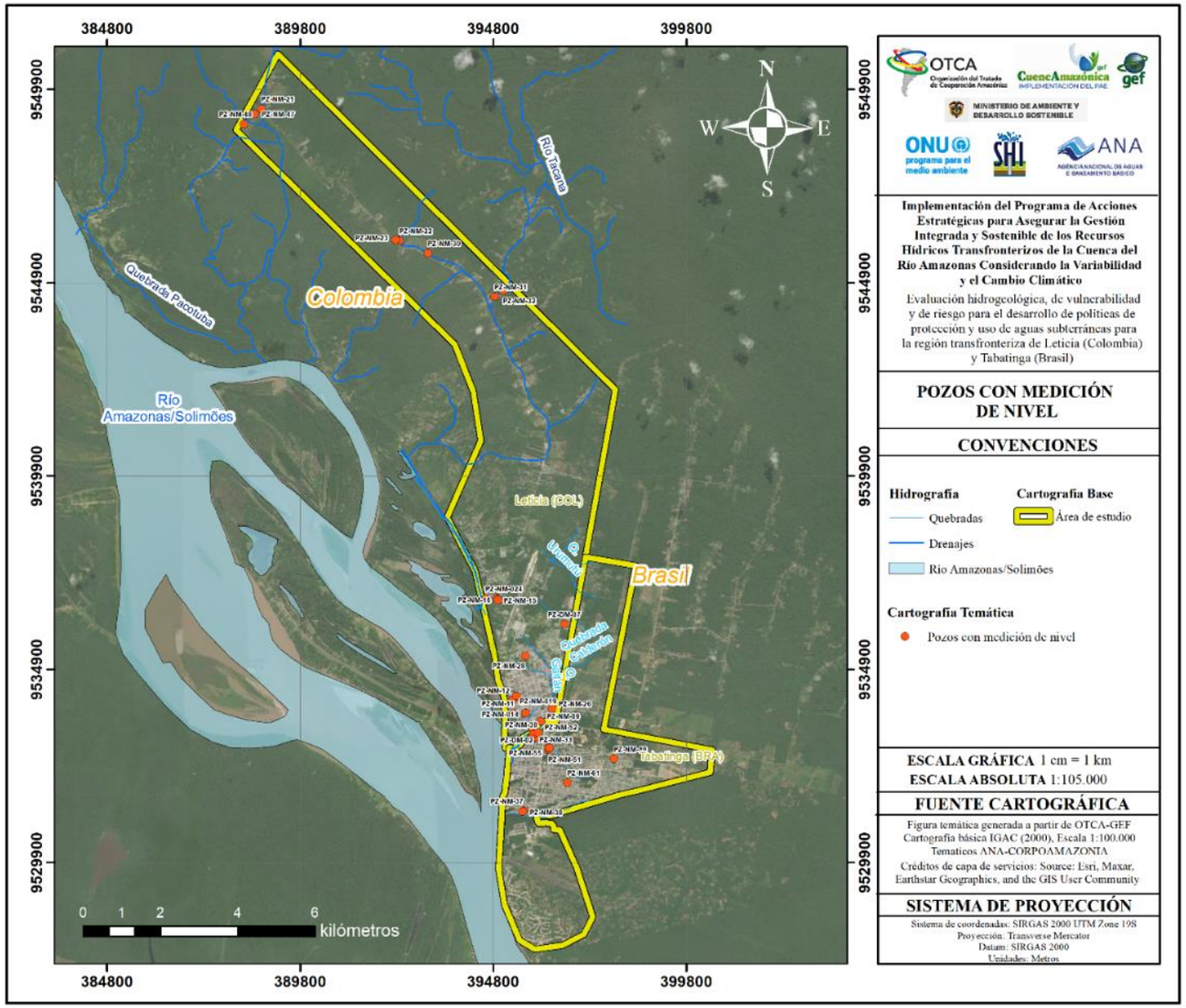


Figura 85. *Mapa de localización de los pozos donde se realizó medición de nivel piezométrico. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

Tabla 65. *Resumen de valores altimétricos obtenidos mediante GNSS con técnica RTK Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Nombre	Tipo de punto	Coordenadas – UTM Zone 19S		Elevación (m.s.n.m.)	Altura elipsoidal (m)	Elevación del nivel piezométrico (m.s.n.m.)
		Este	Norte			
BASE IGAC	BASE	396.344,51	9.533.492,57	77,567	96,656	--
PZ-DM-02	ALJIBE	395.834,51	9.533.326,43	70,213	89,309	70,103
PZ-DM-03	POZO	396.088,87	9.533.790,75	78,046	97,134	--
PZ-DM-05	POZO	389.032,20	9.549.482,93	82,723	101,741	--
PZ-DM-06	POZO	391.438,21	9.546.844,92	80,662	99,674	--
PZ-DM-07	POZO	396.643,61	9.536.065,55	77,704	96,763	74,574
PZ-DM-08	POZO	395.909,50	9.535.279,29	77,761	96,835	--
PZ-NM-14	POZO	395.640,24	9.533.767,01	77,624	96,717	70,244
PZ-NM-19	POZO	395.308,19	9.534.104,59	78,428	97,521	70,228
PZ-NM-24	POZO	394.600,65	9.536.729,70	78,038	97,111	68,138
PZ-NM-03	POZO	393.963,01	9.538.652,43	77,488	96,549	--
PZ-NM-09	POZO	396.030,08	9.533.548,01	78,356	97,448	71,956
PZ-NM-11	POZO	395.341,27	9.533.758,46	76,893	95,989	70,263
PZ-NM-12	POZO	395.397,52	9.534.212,52	77,849	96,940	71,629
PZ-NM-15	POZO	394.892,01	9.536.734,00	78,963	98,033	72,123
PZ-NM-16	POZO	394.920,08	9.536.641,56	78,783	97,853	71,323
PZ-NM-21	POZO	388.790,93	9.549.402,93	83,886	102,907	78,186
PZ-NM-22	POZO	392.365,92	9.545.992,69	79,165	98,174	77,935
PZ-NM-23	POZO	392.268,57	9.546.012,93	78,878	97,888	77,028
PZ-NM-25	POZO	395.622,02	9.534.365,05	78,239	97,326	--
PZ-NM-26	POZO	396.327,08	9.533.869,37	77,932	97,017	73,632
PZ-NM-27	POZO	396.773,65	9.536.610,61	78,300	97,352	--
PZ-NM-28	POZO	395.630,20	9.535.247,85	78,259	97,336	73,759
PZ-NM-30	POZO	393.104,64	9.545.667,00	81,005	100,008	77,985
PZ-NM-31	POZO	394.834,10	9.544.542,67	80,671	99,664	73,201
PZ-NM-32	POZO	395.056,34	9.544.690,64	80,013	99,002	76,013
PZ-NM-33	POZO	395.820,96	9.533.076,92	77,609	96,708	70,649
PZ-NM-34	POZO	395.801,95	9.533.158,59	78,495	97,592	74,475
PZ-NM-35	POZO	395.851,12	9.533.146,21	78,549	97,647	70,549
PZ-NM-36	POZO	395.881,06	9.533.138,13	78,423	97,520	70,868
PZ-NM-37	POZO	395.587,09	9.531.236,08	76,445	95,564	67,110
PZ-NM-38	POZO	395.565,04	9.531.225,06	76,712	95,832	67,062
PZ-NM-39	POZO	395.848,68	9.533.212,97	76,835	95,932	70,490
PZ-NM-45	POZO	395.767,83	9.533.101,09	77,778	96,877	69,518
PZ-NM-47	POZO	388.620,47	9.549.265,34	82,181	101,206	75,661
PZ-NM-48	POZO	388.337,55	9.549.011,76	81,918	100,948	74,578
PZ-NM-49	POZO	397.927,01	9.532.582,12	78,433	97,515	77,388
PZ-NM-51	POZO	396.225,55	9.532.821,21	78,257	97,354	73,632
PZ-NM-52	POZO	395.965,28	9.533.259,21	76,110	95,205	71,405
PZ-NM-55	POZO	396.229,90	9.532.870,61	77,980	97,076	72,655
PZ-NM-56	POZO	396.252,25	9.532.869,15	77,985	97,081	72,095
PZ-NM-61	POZO	396.719,22	9.531.963,16	77,456	96,557	75,471

10.5.2. Estimación de la superficie potenciométrica y dirección de flujo en la zona

Para actualizar el mapa de niveles piezométricos, se toma como referencia las coordenadas y las cotas obtenidas mediante georreferenciación y nivelación topográfica con GPS de precisión, así como los niveles freáticos medidos durante la campaña de campo realizada entre el 30 de octubre al 18 de noviembre de 2022. Para la elaboración de este producto no se consideran las coordenadas ni la cota adquiridos con GPS de mano ni los niveles freáticos medidos durante la actualización del inventario de puntos de agua que se realizó entre el 14 de septiembre y el 10 de octubre de 2022

A partir de las mediciones de nivel piezométrico realizadas en cada uno de los pozos, se construye una superficie potenciométrica. A pesar de que la superficie permite obtener más confiabilidad en aquellos sectores donde se agrupan la mayor cantidad de datos, es posible tener una aproximación en los otros sectores, especialmente para la tendencia general en la dirección del flujo. En la Figura 86 se muestra el nivel obtenido, distribuido mediante valores de altura en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.):

Los niveles piezométricos presentan menor elevación hacia el occidente de la zona de estudio, en inmediaciones de la margen izquierda del río Amazonas y hacia el sur, donde se localizan las poblaciones de Leticia y Tabatinga. Las mayores elevaciones estimadas se concentran hacia la zona oriental y norte, configurando una tendencia del flujo principal en sentido norte-sur con algunas variaciones locales en sentido oriente-occidente como se esquematiza en la Figura 86 con flechas de color blanco.

Se reconocen algunas zonas con ligeras anomalías en términos de disminución en la elevación respecto a la tendencia, específicamente en la parte central de Tabatinga y Leticia y hacia el norte, en las proximidades al aeropuerto Alfredo Vásquez Cobo; estas anomalías pueden responder a la densidad de captaciones en las inmediaciones de esas zonas, a variaciones por cambios locales en los materiales y métodos constructivos de los pozos, sin representar cambios drásticos a nivel regional.

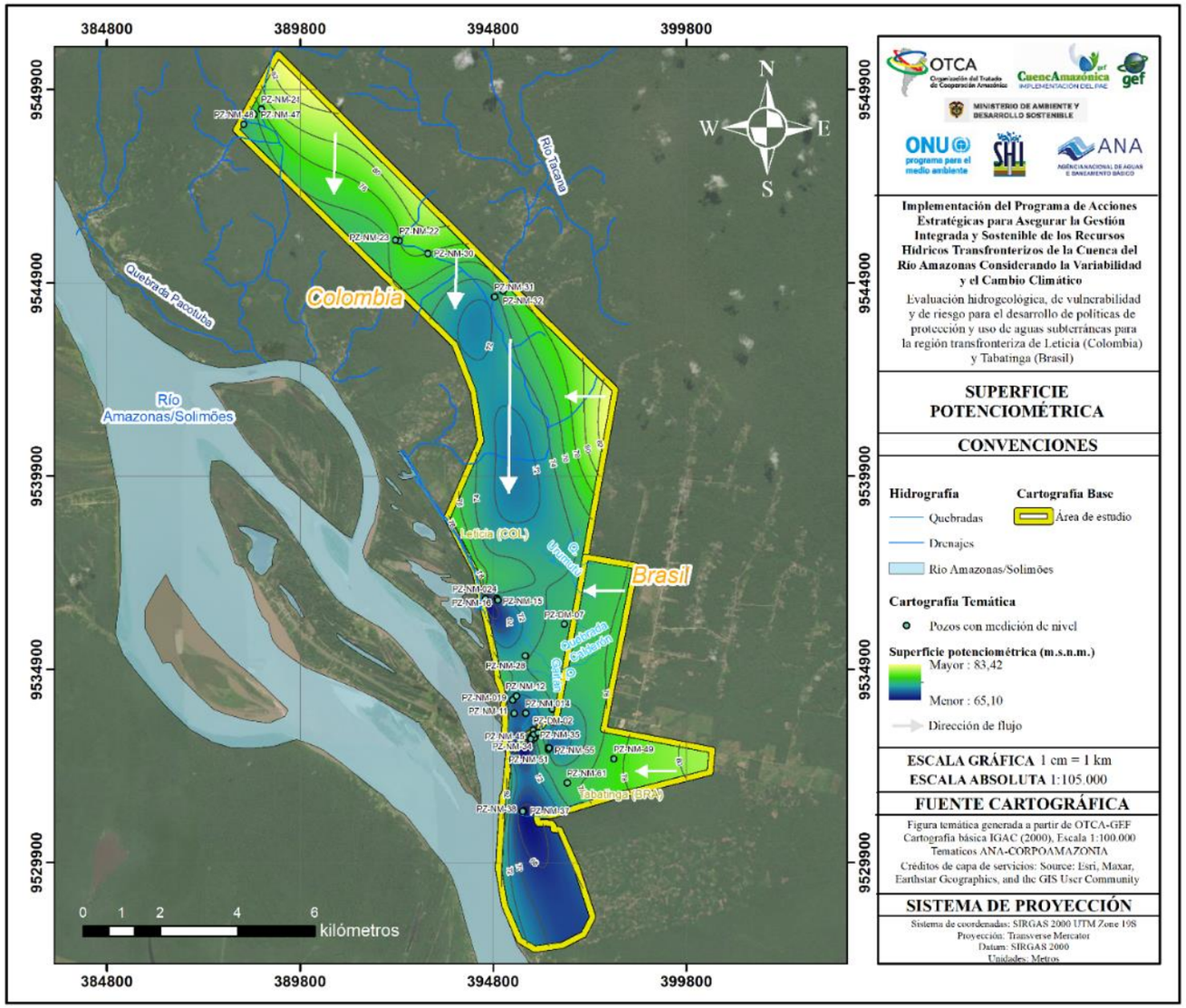


Figura 86. *Superficie potenciométrica a partir de valores medidos en la zona de estudio. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

9.5. Toma de muestras para calidad del agua subterránea

En el **Anexo_05_CalidadAgua** se encuentran consignados los resultados de los parámetros de campo evaluados por cada punto de monitoreo de la red. A continuación, se realiza un análisis por cada parámetro de campo, bajo los marcos normativos de calidad de agua de Brasil y de Colombia, para los 60 punto de monitoreo.

9.5.1. Análisis de resultados – parámetros de campo

En la Tabla 66 se presentan los resultados de las mediciones realizados en campo de los parámetros fisicoquímicos para los puntos de monitoreo preliminar.

Tabla 66. *Parámetros fisicoquímicos medidos en campo de los puntos de monitoreo preliminar. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Punto monitoreo	Localización	pH (unidades de pH)	Oxígeno disuelto (mg O_2/l)	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS/cm)
PZ-DM-001	Leticia	5,9	3,74	28,7	76,4
PZ-DM-002	Leticia	5,5	3,37	26,8	139,9
PZ-DM-003	Leticia	5,5	5,41	27,2	80,9
PZ-DM-005	Leticia	5,3	3,51	32,2	22,6
PZ-DM-006	Leticia	5,7	4,29	26,2	42,5
PZ-DM-007	Leticia	4,6	3,58	31,1	25,4
PZ-NM-001	Leticia	6,4	1,71	32,4	148,5
PZ-NM-005	Leticia	5,5	5,75	28,1	77,3
PZ-NM-006	Leticia	5,1	5,17	29,8	105,0
PZ-NM-007	Leticia	4,9	6,02	29,6	109,6
PZ-NM-008	Leticia	5,4	4,45	28,6	81,7
PZ-NM-011	Leticia	4,1	3,79	25,6	140,3
PZ-NM-012	Leticia	5,3	4,35	31,9	53,0
PZ-NM-013	Leticia	5,1	3,47	31,4	11,78
PZ-NM-014	Leticia	4,2	4,96	25,5	113,8
PZ-NM-015	Leticia	5,4	4,59	35,2	52,9
PZ-NM-016	Leticia	4,7	3,48	32,5	52,9
PZ-NM-019	Leticia	5,5	2,73	32,9	97,5
PZ-NM-002	Leticia	6,3	7,04	31,0	39,9
PZ-NM-021	Leticia	5,1	2,18	29,5	48,4
PZ-NM-022	Leticia	6,5	3,78	27,0	141,2
PZ-NM-023	Leticia	4,8	1,85	30,5	46,8
PZ-NM-025	Leticia	4,8	3,67	32,0	70,4
PZ-NM-026	Leticia	5,5	5,60	33,1	99,1
PZ-NM-027	Leticia	4,8	5,97	35,1	16,2

Punto monitoreo	Localización	pH (unidades de pH)	Oxígeno disuelto (mg O_2/l)	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS/cm)
PZ-NM-028	Leticia	4,4	4,68	34,1	102,9
PZ-NM-029	Leticia	5,4	2,92	25,2	119,3
PZ-NM-003	Leticia	5,7	5,48	30,5	30,0
PZ-NM-030	Leticia	4,7	5,71	24,5	16,1
PZ-NM-031	Leticia	4,5	3,85	30,2	20,95
PZ-NM-032	Leticia	5,2	3,39	32,4	33,7
PZ-NM-009	Leticia	5,1	3,93	21,6	69,2
PZ-NM-024	Leticia	5,0	2,94	32,5	52,3
PZ-NM-047	Leticia	5,2	4,35	30,1	47,0
PZ-NM-048	Leticia	5,0	1,86	26,6	30,0
PZ-NM-049	Tabatinga	5,6	2,6	31,9	100,6
PZ-NM-050	Tabatinga	4,6	3,12	33,2	39,0
PZ-NM-051	Tabatinga	4,6	5,00	33,7	85,4
PZ-NM-052	Tabatinga	4,1	4,85	33,3	97,7
PZ-NM-053	Tabatinga	4,5	4,73	33,6	126,9
PZ-NM-054	Tabatinga	4,8	5,55	30,3	103,8
PZ-NM-055	Tabatinga	4,3	5,05	31,0	95,2
PZ-NM-056	Tabatinga	4,8	4,04	34,9	139,1
PZ-NM-057	Tabatinga	5,1	4,59	31,5	72,3
PZ-NM-058	Tabatinga	5,3	5,52	33,9	49,2
PZ-NM-059	Tabatinga	4,5	3,45	31,3	264,0
PZ-NM-060	Tabatinga	4,5	4,31	36,5	37,9
PZ-NM-061	Tabatinga	5,9	5,2	31,0	157,8
PZ-NM-062	Tabatinga	4,6	4,25	24,9	241,1
PZ-NM-020	Tabatinga	4,5	5,00	30,0	73,0
PZ-NM.033	Tabatinga	4,8	4,37	35,8	171,5
PZ-NM-034	Tabatinga	4,6	4,19	31,7	142,3
PZ-NM-036	Tabatinga	4,3	3,30	29,5	112,0
PZ-NM-037	Tabatinga	5,0	5,63	26,8	146,0
PZ-NM-038	Tabatinga	5,2	6,81	30,4	83,9
PZ-NM-039	Tabatinga	4,5	4,19	27,2	164,1
PZ-NM-040	Tabatinga	4,3	3,53	25,8	180,3
PZ-NM-042	Tabatinga	4,3	4,63	31,5	122,2
PZ-NM-044	Tabatinga	4,8	5,13	31,5	111,8
PZ-NM-045	Tabatinga	5,3	5,43	27,6	107,1

- **Potencial de hidrogeno**

Los valores de pH registrados varían entre 4,1 y 6,5, con un promedio general de 5,01. En promedio, los puntos de Tabatinga parecen ser más ácidos en comparación con el agua monitoreada en Leticia (Figura 87 y Figura 89).

Los valores bajos en los pH de los puntos de agua subterránea (pH <5) se deben a la variación en la concentración de oxígeno disuelto, la cual puede incrementar la presencia de formas del bicarbonato y carbono, desbalanceando la relación entre ácidos y bases (Malagón, 2017). Por otro lado, también puede deberse a la presencia de sulfuros en las unidades geológicas a nivel regional contribuye a la acidificación del agua.

El agua para consumo humano debe mantener un pH entre 6,5 y 9.0 según la Resolución 2115 de 2007 de Colombia (MPS & MAVDT, 2007), mientras que, en Brasil, la Portaria GM/MS n° 888/2021 (Ministério da Saúde, 2021) no establece un límite para este parámetro. Según lo anterior, todos los puntos monitoreados en Colombia están fuera de los estándares establecidos para agua para consumo humano.

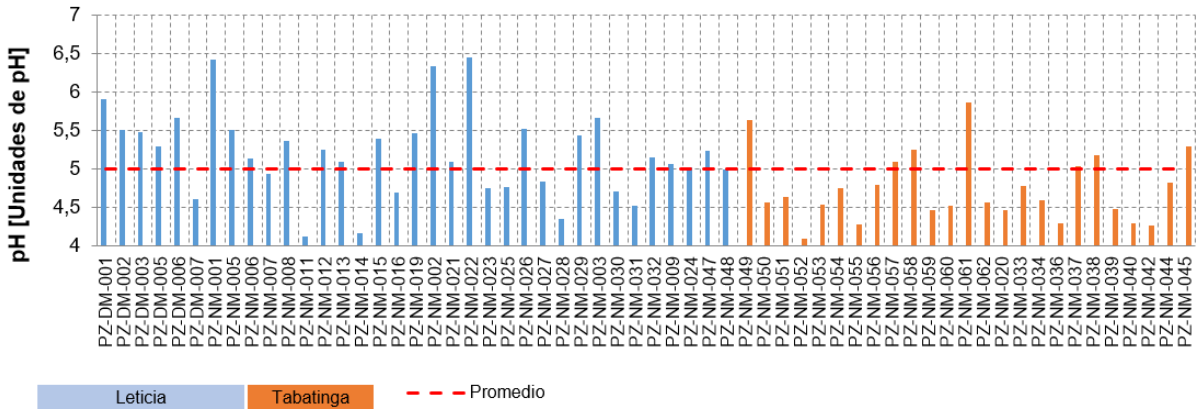


Figura 87. *pH en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

- **Oxígeno disuelto**

La concentración de oxígeno disuelto varía entre 1,7 y 7,0 mg/l con un promedio de 4,3 mg/l como se aprecia en la Figura 88. Según los resultados obtenidos al menos el 60% de los puntos presentan concentraciones mayores a 4 mg/l y el 95% concentraciones superiores a 2 mg/l, lo cual indica que se tratan de aguas de flujo e infiltración rápida, dado que en aguas subterráneas con mayor tiempo de residencia lo esperado es encontrar concentraciones de oxígeno disuelto inferiores. De manera general, se observa que las menores concentraciones se presentan al norte de la zona de estudio (Figura 90). Por otro lado, de los 60 puntos monitorizados, sólo 3 puntos ubicados en Leticia tienen concentraciones inferiores a 2 mg/l (PZ-NM-001, PZ-NM-048 y PZ-NM-023). Estas se clasifican como aguas muy deficientes según el RAS – 2000 (MVCT, 2017).

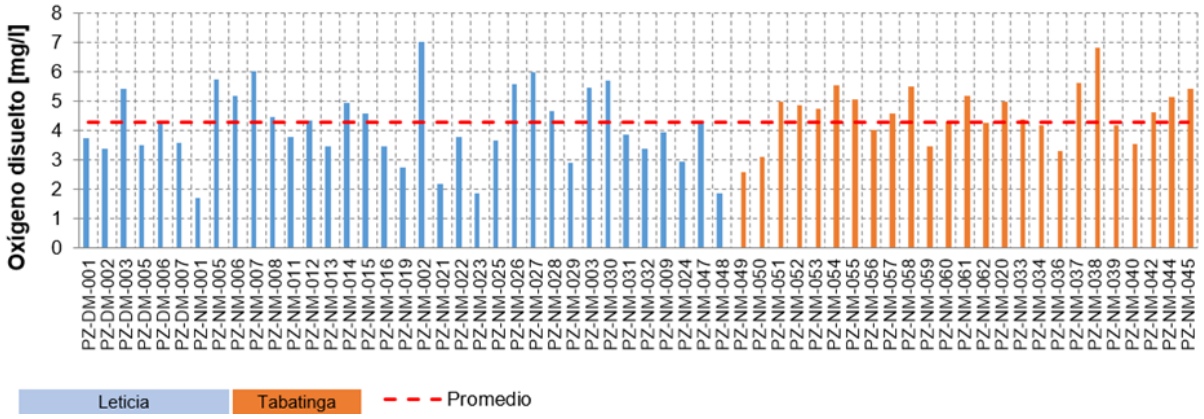


Figura 88. *Concentración de oxígeno disuelto en los 60 puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

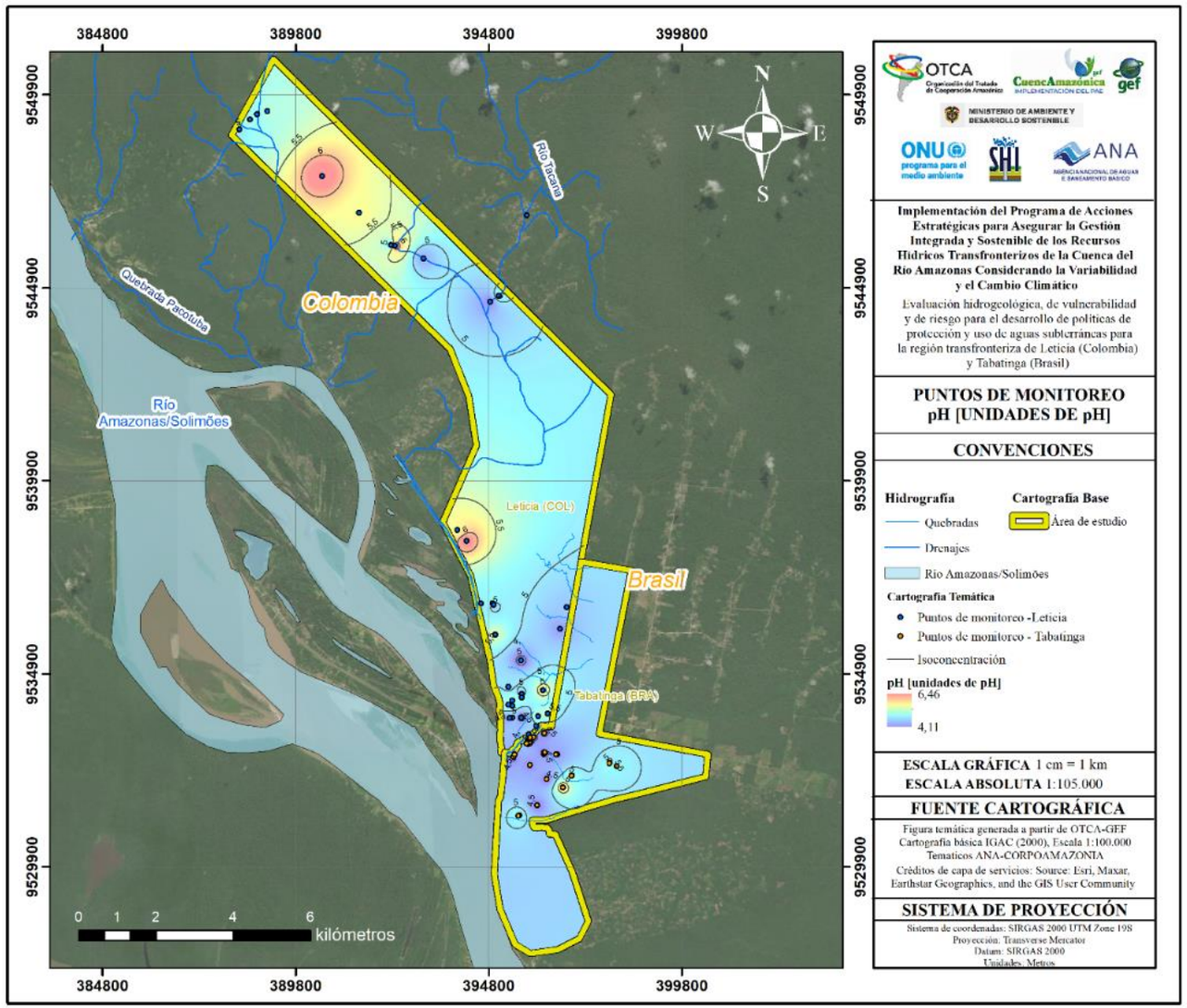


Figura 89. *Distribución espacial del pH [unidades de pH]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

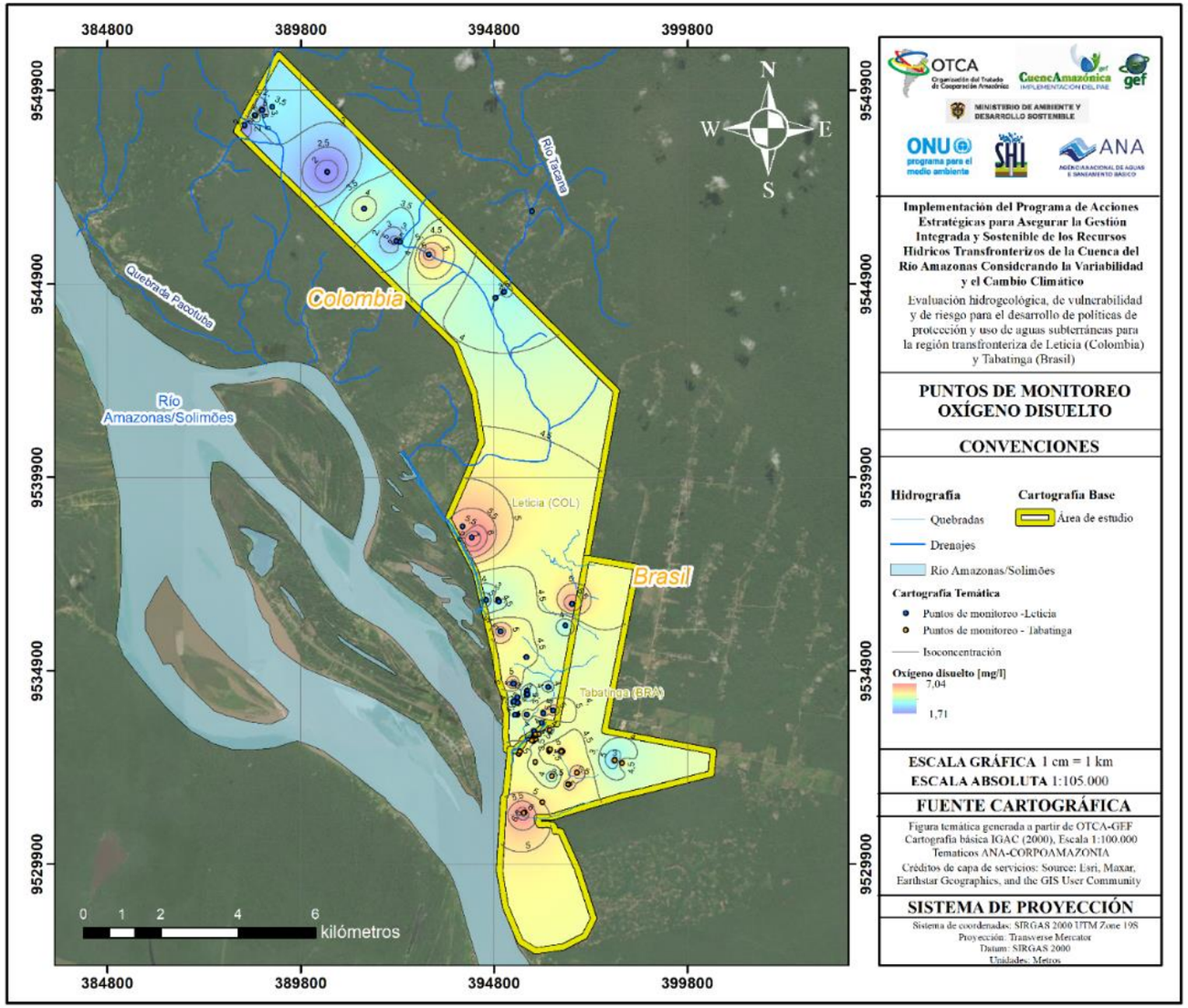


Figura 90. *Distribución espacial de la concentración de oxígeno disuelto [mg/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad en los puntos de monitoreo varía entre 11,8 y 264 µs/cm con un promedio de 90,7 µs/cm (Figura 91). En general, el agua de todos los puntos presenta conductividades eléctricas bajas, indicando baja mineralización de las aguas subterráneas del acuífero transfronterizo. Sin embargo, se observa que el agua de los puntos en Tabatinga presenta valores de conductividad eléctrica ligeramente mayores a las aguas subterráneas de Leticia (Figura 92).

La baja conductividad eléctrica del acuífero en conjunto con valores de oxígeno disuelto alto está indicando que el agua subterránea tiene una interacción constante con agua de recarga reciente pero también con agua de escorrentía y drenajes superficiales en la zona, incluido el río Amazonas para aquellos puntos cercanos a este.

De acuerdo con la Resolución 2115 de 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 en Colombia, todos los puntos se encuentran en un rango admisible de conductividad (<1000 µs/cm).

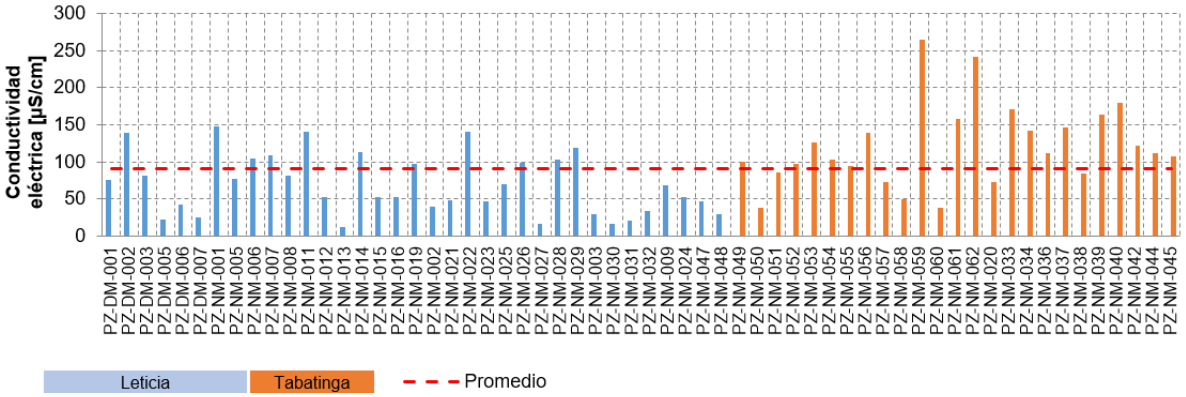


Figura 91. *Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

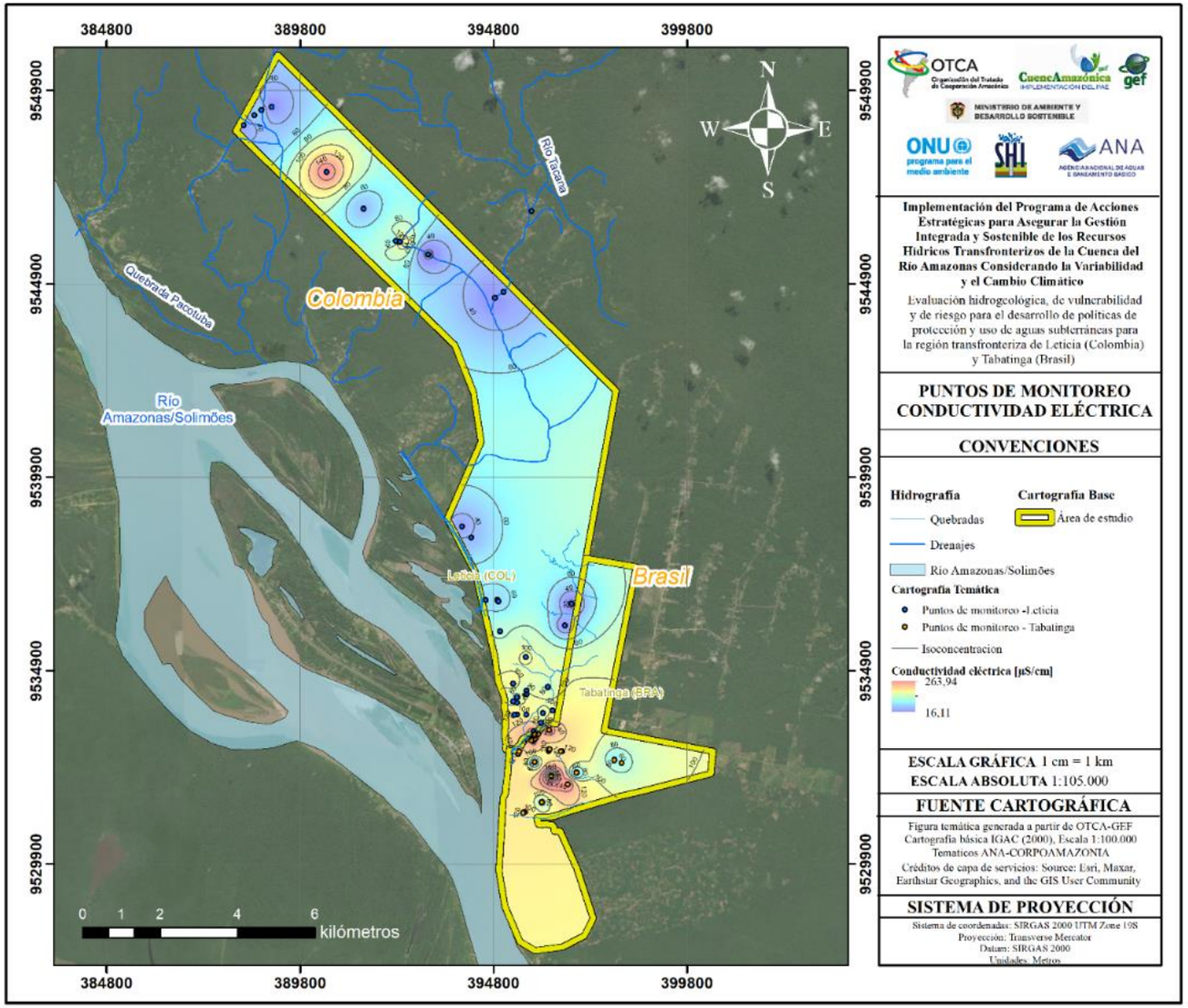


Figura 92. *Distribución espacial de la conductividad eléctrica [µS/cm]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Temperatura**

La temperatura de los puntos de monitoreo preliminar oscila entre 21,6 °C - 36,5°C, con un promedio de 30,3°C, como se muestra en la Figura 93. En general, la distribución de la temperatura es similar para Leticia y para Tabatinga, donde los valores cercanos a los 30°C reflejan las condiciones climáticas de la zona, la cual se caracteriza por un predominio de temperaturas cálidas (Figura 94).

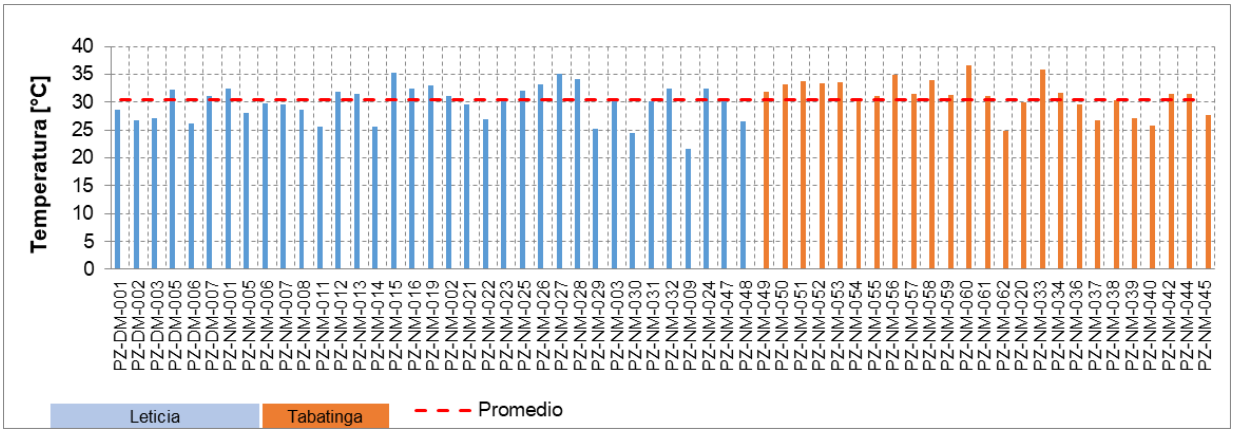


Figura 93. *Temperatura en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

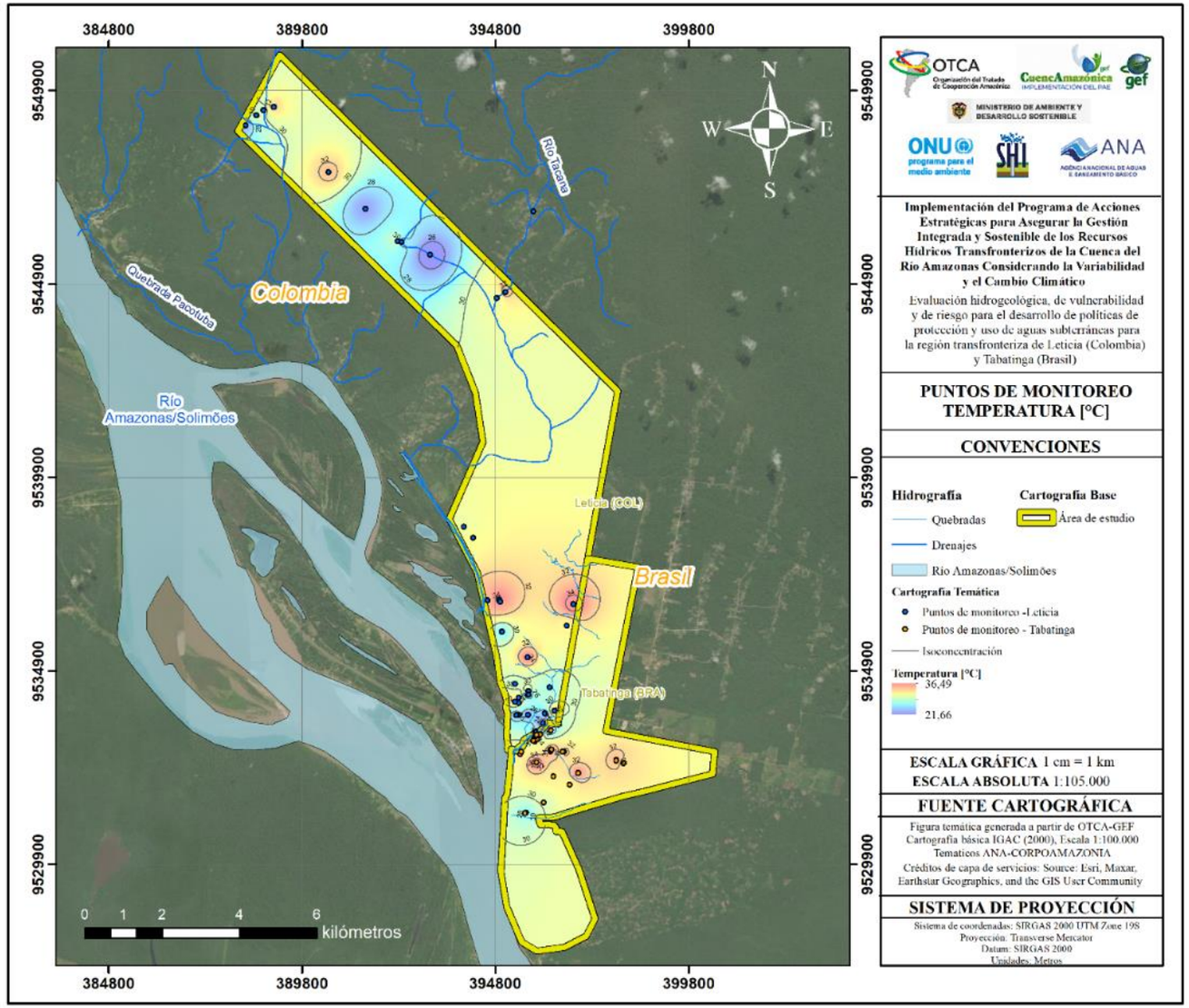


Figura 94. *Distribución espacial de la temperatura [°C]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

9.5.2. Análisis de resultados – parámetros de laboratorio

En el **Anexo_05_CalidadAgua** se encuentran consignados los resultados de los parámetros evaluados en laboratorio para cada punto de monitoreo de la red. A continuación, se presenta un análisis por parámetro bajo el marco normativo de calidad de agua.

- **Calidad de resultados de laboratorio y balance iónico**

En la Figura 95 se presenta el balance de electro – neutralidad, el cual se hace utilizando los iones mayoritarios o más abundantes en el agua, que son bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sodio, calcio, magnesio y potasio. De acuerdo con la metodología descrita en el **Anexo_00_InformesAntecedentes**, se estimó el error en el balance iónico para las 60 muestras. Los puntos con errores de balance por encima de 10% se evaluaron de acuerdo con la conductividad eléctrica de cada punto, acorde con (Custodio & Llamas, 1975).

Del total de muestras, solo 5 no cumplen con el error de balance, sin embargo, esto es posible que se deba a que, en la mayoría de estos casos, los sólidos disueltos totales son bajos y los iones medidos se encuentran por debajo del límite de detección, de forma los valores empleados en el balance no corresponden a las concentraciones reales en las muestras; a pesar de esto, no se descartan, porque pueden aportar información importante de la zona de estudio.

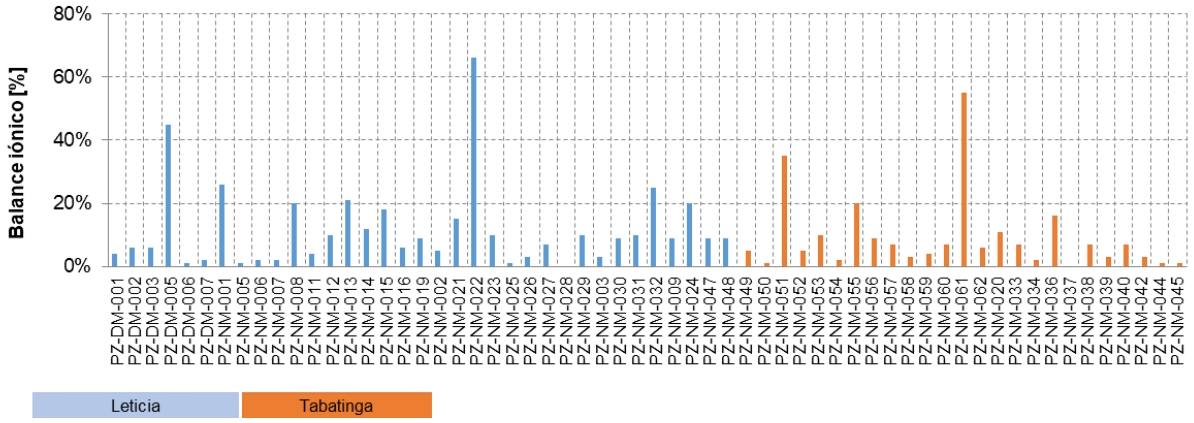


Figura 95. *Balance de electro – neutralidad de los puntos que conforman la red de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

- **Sólidos disueltos totales**

Los sólidos disueltos totales varían entre 6-165 mg/l, con un promedio de 53 mg/l (Figura 96). En general, todos los puntos presentan sólidos disueltos relativamente bajos; sin embargo, y de manera similar a lo registrado en la conductividad eléctrica, los valores de este parámetro son mayores a las aguas subterráneas de Tabatinga (Figura 97). Todos los puntos de monitoreo presentan sólidos disueltos totales aceptables (<500 mg/l) según lo establecido en la *Portaria* GM/MS n° 888/2021 (Ministério da Saúde, 2021); por tanto, no se presenta restricción en uso para consumo humano.

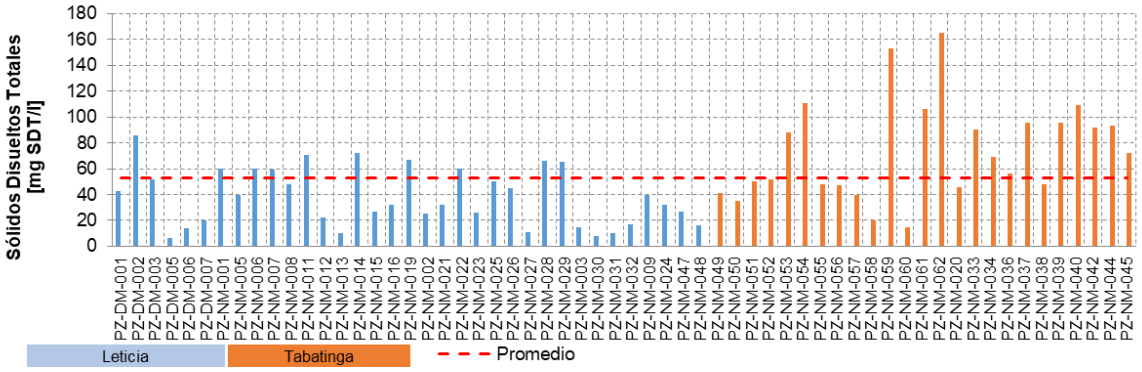


Figura 96. *Solidos disueltos totales de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

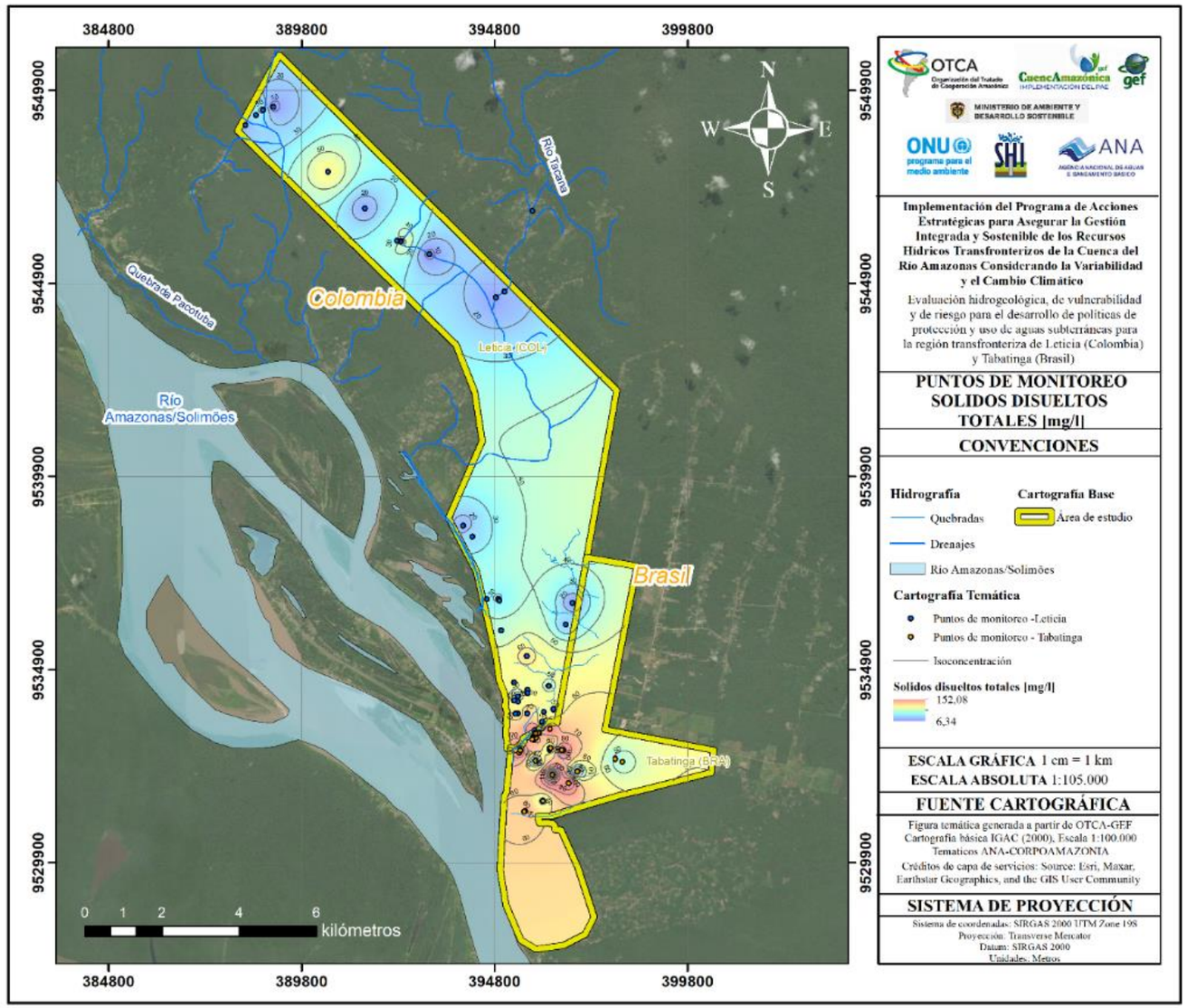


Figura 97. *Distribución espacial de la concentración de sólidos disueltos totales [mg/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Alcalinidad total, fenolftaleína, carbonatos y bicarbonatos**

La alcalinidad es la capacidad del agua de neutralizar ácidos y está influenciada por el pH, la composición general del agua, la temperatura y la fuerza iónica. Por lo general, está presente en las aguas naturales como un equilibrio de carbonatos y bicarbonatos.

Debido a la fuerte influencia que tiene el pH sobre la alcalinidad, en el laboratorio se realizaron mediciones de dos tipos de alcalinidad conocidas como alcalinidad a la fenolftaleína y alcalinidad total, una regla general establecida gracias a la termodinámica del equilibrio y a la forma de análisis de laboratorio establece que la alcalinidad fenolftaleína para aguas en las que el pH es menor a 8,3 debe ser igual a cero y la concentración de alcalinidad debe ser exactamente igual a la concentración de bicarbonatos, comportamiento que se observa en las aguas de la zona de estudio como se muestra en la Tabla 67 y la Figura 98. Así mismo, los carbonatos deberían presentar una concentración de 0 (mg $CaCO_3$/l) y para estos datos el laboratorio reporta valores de <4,00.

Para la alcalinidad a la fenolftaleína y alcalinidad total, el laboratorio registra valores menores a <1,89 y <5,00 mg $CaCO_3$/l, respectivamente sin dar un valor exacto; esto tiene que ver con el límite de cuantificación de laboratorio, que sólo detecta valores con alta confiabilidad hasta 1,89 y 5 mg/l, indicando que los valores de estos parámetros pueden estar entre 0 y 5 mg/l.

Tabla 67. *Resultados laboratorio de alcalinidad, carbonatos y bicarbonatos. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Punto	Alcalinidad a la Fenolftaleína (mg $CaCO_3$/l)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/l) (A)	Bicarbonatos	Carbonatos (mg $CaCO_3$/l) (A)
PZ-DM-001	<1,89	23,13	23,13	<4,00
PZ-DM-002	<1,89	14,66	14,66	<4,00
PZ-DM-003	<1,89	16,00	16,00	<4,00
PZ-DM-005	<1,89	<5,00	3,00	<4,00
PZ-DM-006	<1,89	<5,00	4,96	<4,00
PZ-DM-007	<1,89	<5,00	4,85	<4,00
PZ-NM-001	<1,89	16,77	16,77	<4,00
PZ-NM-005	<1,89	10,75	10,75	<4,00
PZ-NM-006	<1,89	13,98	13,98	<4,00
PZ-NM-007	<1,89	16,73	16,23	<4,00
PZ-NM-008	<1,89	8,38	8,38	<4,00
PZ-NM-011	<1,89	10,64	10,64	<4,00
PZ-NM-012	<1,89	<5,00	3,00	<4,00
PZ-NM-013	<1,89	<5,00	4,78	<4,00
PZ-NM-014	<1,89	<5,00	3,41	<4,00
PZ-NM-015	<1,89	7,09	7,09	<4,00
PZ-NM-016	<1,89	5,48	5,48	<4,00
PZ-NM-019	<1,89	15,53	15,53	<4,00
PZ-NM-002	<1,89	6,92	6,92	<4,00
PZ-NM-021	<1,89	21,68	21,68	<4,00

Punto	Alcalinidad a la Fenolftaleína (mg $CaCO_3$/l)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/l) (A)	Bicarbonatos	Carbonatos (mg $CaCO_3$/l) (A)
PZ-NM-022	<1,89	26,96	26,96	<4,00
PZ-NM-023	<1,89	7,95	7,95	<4,00
PZ-NM-025	<1,89	<5,00	4,53	<4,00
PZ-NM-026	<1,89	5,39	5,39	<4,00
PZ-NM-027	<1,89	<5,00	3,13	<4,00
PZ-NM-028	<1,89	<5,00	3,00	<4,00
PZ-NM-029	<1,89	20,13	20,13	<4,00
PZ-NM-003	<1,89	6,47	6,47	<4,00
PZ-NM-030	<1,89	<5,00	3,02	<4,00
PZ-NM-031	<1,89	<5,00	3,00	<4,00
PZ-NM-032	<1,89	<5,00	3,00	<4,00
PZ-NM-009	<1,89	12,08	12,08	<4,00
PZ-NM-024	<1,89	<5,00	3,00	<4,00
PZ-NM-047	<1,89	6,66	6,66	<4,00
PZ-NM-048	<1,89	5,18	5,18	<4,00
PZ-NM-049	<1,89	41,91	41,91	<4,00
PZ-NM-050	<1,89	9,19	9,19	<4,00
PZ-NM-051	<1,89	<5,00	4,96	<4,00
PZ-NM-052	<1,89	<5,00	5,16	<4,00
PZ-NM-053	<1,89	5,26	5,26	<4,00
PZ-NM-054	<1,89	7,33	7,33	<4,00
PZ-NM-055	<1,89	<5,00	3,02	<4,00
PZ-NM-056	<1,89	<5,00	3,34	<4,00
PZ-NM-057	<1,89	12,83	15,65	<4,00
PZ-NM-058	<1,89	7,88	7,88	<4,00
PZ-NM-059	<1,89	<5,00	3,00	<4,00
PZ-NM-060	<1,89	<5,00	3,66	<4,00
PZ-NM-061	<1,89	53,88	53,88	<4,00
PZ-NM-062	<1,89	6,40	6,40	<4,00
PZ-NM-020	<1,89	5,47	5,47	<4,00
PZ-NM-033	<1,89	6,26	6,26	<4,00
PZ-NM-034	<1,89	<5,00	3,34	<4,00
PZ-NM-036	<1,89	<5,00	3,77	<4,00
PZ-NM-037	<1,89	12,18	12,18	<4,00
PZ-NM-038	<1,89	8,88	8,88	<4,00
PZ-NM-039	<1,89	5,88	5,88	<4,00
PZ-NM-040	<1,89	<5,00	3,00	<4,00
PZ-NM-042	<1,89	<5,00	3,20	<4,00

Punto	Alcalinidad a la Fenolftaleína (mg $CaCO_3$/l)	Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/l) (A)	Bicarbonatos	Carbonatos (mg $CaCO_3$/l) (A)
PZ-NM-044	<1,89	10,22	10,22	<4,00
PZ-NM-045	<1,89	10,32	10,32	<4,00

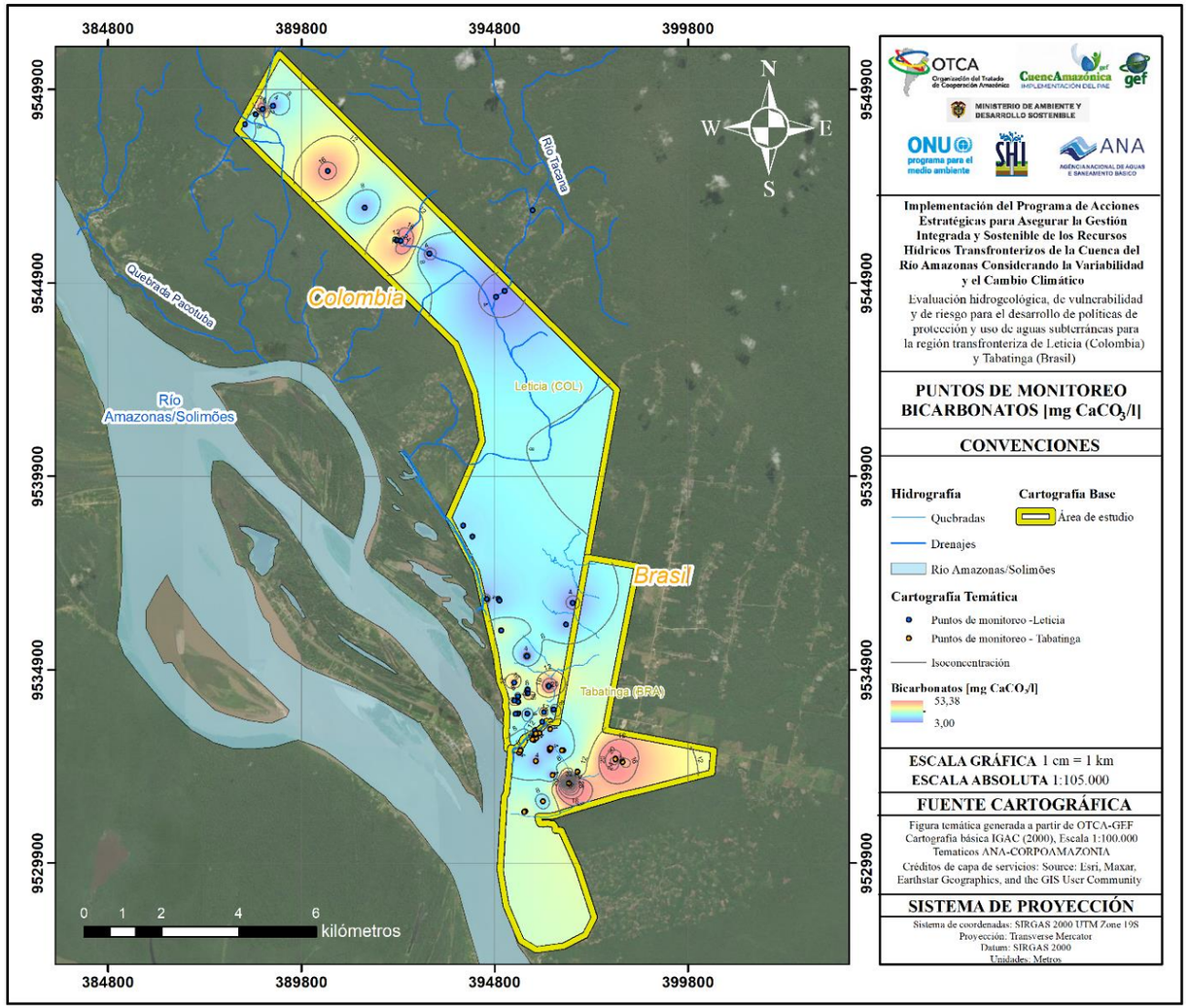


Figura 98. *Distribución espacial de las concentraciones de bicarbonato [mg $CaCO_3$/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Turbiedad**

La turbiedad puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas tanto orgánicas o inorgánicas; la turbiedad no solo tiene un impacto estético en el agua, sino que es indicativo de una mayor probabilidad de contaminación. Este parámetro oscila en un rango amplio entre <1 – 160 NTU, con un promedio de 19,2 NTU, donde el 57% de las muestras se encuentran por debajo del límite de detección (1 NTU). Sin embargo, cerca del 30 % de las muestras sobrepasan el límite máximo permitido de 5 NTU para aguas de consumo doméstico según lo establecido en la *Portaria* GM/MS n° 888/2021 de Brasil y el 37% sobrepasan el límite máximo permitido de 2 NTU para consumo doméstico según lo definido en la Resolución 2115 de 2007 de Colombia. Los mayores valores se registraron en los pozos PZ-NM-001, PZ-NM-007, PZ-NM-012, PZ-NM-021, PZ-NM-039 y PZ-NM-052, alcanzando valores superiores a las 20 NTU.

- **Demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO)**

La demanda biológica de oxígeno es la cantidad de oxígeno necesario para degradar, mediante procesos bioquímicos, toda la materia orgánica presente en el agua y es una medida cuantitativa de la contaminación del agua por materia orgánica. La manera más habitual en la que se expresa este parámetro es como DBO_5, que es la DBO (expresada en mg de O_2/l) de una muestra incubada 5 días a 20˚C. Por su parte, la demanda química de oxígeno (DQO) hace referencia a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica presente en el agua, sea biodegradable o no.

En la zona los valores de DBO_5 varían entre 2,19 y 12,73 mg O_2/l, con un promedio de 4,77 mg O_2/l (Figura 99). En general, es posible observar que la mayoría de las muestras analizadas presentan algún grado de contaminación por materia orgánica, debido a que, según el RAS - 2000 (MINDESA, 2000), el valor máximo diario de DBO_5 para fuentes de aguas aceptables debe estar entre 1-3 mg O_2/l, mientras que para fuentes regulares debe ser entre 3-4 mg O_2/l y para fuentes deficientes entre 4 – 6 mg O_2/l; aunque este documento hace alusión a los sistemas de potabilización del agua, este presenta la clasificación de los niveles de calidad de las fuentes de abastecimiento en función de unos parámetros mínimos físico- químicos y microbiológicos y permite determinar el grado de contaminación del agua asociado al grado de tratamiento respectivo.

Según la Resolución CONAMA N° 357/2005, el agua con DBO hasta 3 mg/l O_2 (20°C) entra en la Clase 1, refiriéndose a los usos más exigentes, a medida que disminuye el nivel de exigencia los valores aumentan (hasta 5 mg/l en la Clase 2, hasta 10 mg/l en la Clase 3 y por encima de este valor en la Clase 4)

En este sentido, los puntos con un mayor grado de contaminación por materia orgánica biodegradable corresponden a los pozos PZ-NM-002, PZ-NM-007, PZ-NM-014, PZ-NM-037, PZ-NM-044, PZ-NM-045, PZ-NM-049 y PZ-NM-061 los cuales se ubican principalmente en Tabatinga mientras que, en Leticia, especialmente al norte de la zona de estudio, predominan los valores bajos de DBO_5 (Figura 100).

Por su parte, los valores de DQO presentan un promedio de 31,8 mg O_2/l y un máximo de 39,30 mg O_2/l, donde el 78% de las muestras presentan valores de DQO por debajo del límite de detección

(25 mg O_2/l). Los puntos que registran un mayor contenido de DQO corresponden a PZ-NM-007, PZ-NM-008, PZ-NM-033, PZ-NM-034, PZ-NM-037, PZ-NM-044 y PZ-NM-045, PZ-NM-052, y PZ-NM-056.

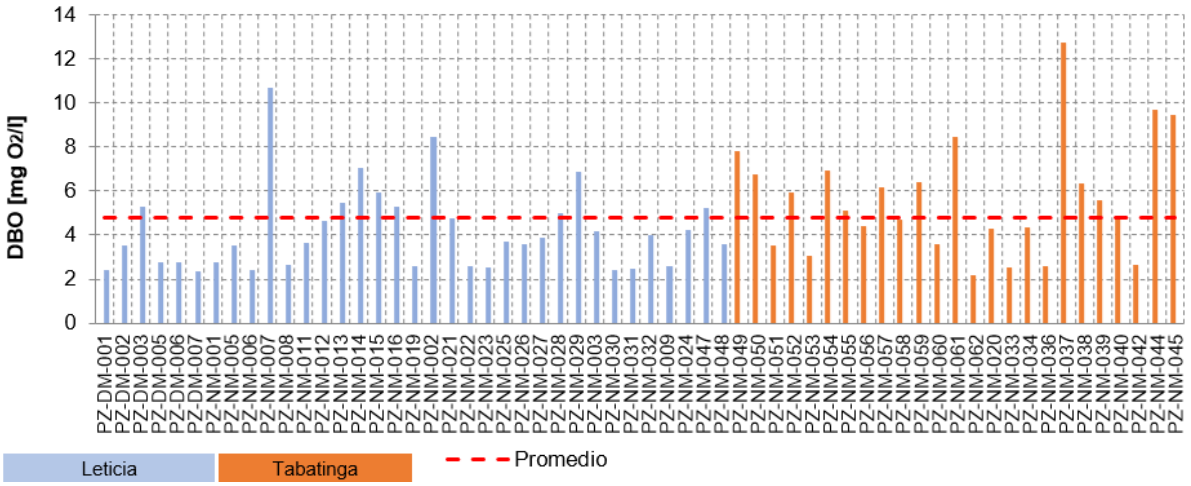


Figura 99. *Demanda biológica de oxígeno (DBO_5) de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

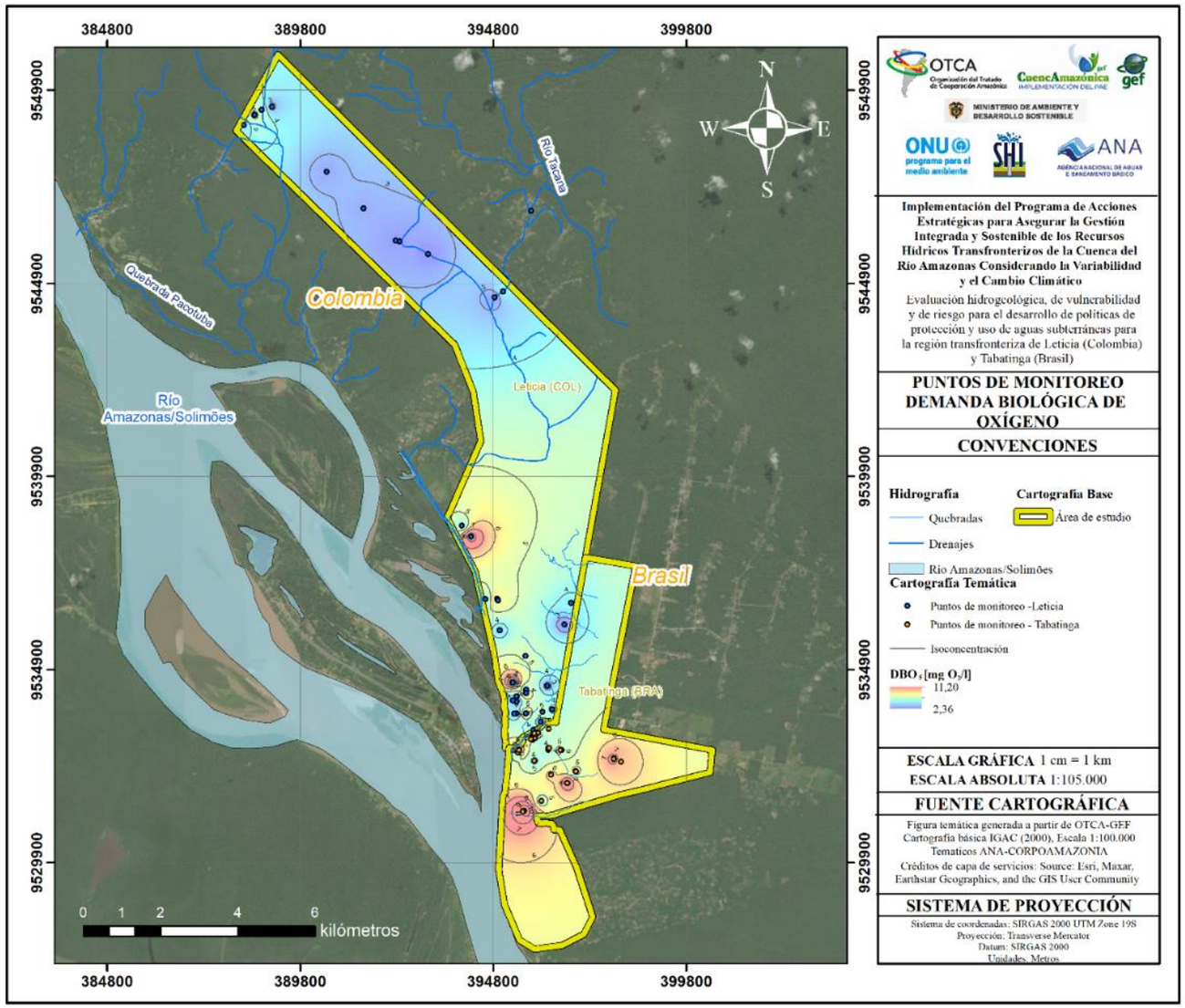


Figura 100. *Distribución espacial de la demanda biológica de oxígeno. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

- **Nitratos, nitritos y coliformes**

La concentración de nitrato y nitrito en aguas subterráneas suele ser baja, pero puede llegar a aumentar debido a la filtración o escorrentía de contaminantes agrícolas, mineros o por residuos humanos o animales como consecuencia de la oxidación del amoniaco y fuentes similares.

Aunque la industria minera y agrícola en la zona no predomina, para los puntos de monitoreo se registran valores de nitrato entre <0,05 – 27,54 mg NO_3/l, con un promedio de 6,55 mg NO_3/l, donde el 73% de las muestras presentan valores por debajo del límite de detección (0,05 mg NO_3/l). Los pozos PZ-NM-050, PZ-NM-052, PZ-NM-062, PZ-NM-038, PZ-NM-040, PZ-NM-042 y PZ-NM-044 registran las mayores concentraciones de nitrato (Figura 101), por lo que es probable que en estos puntos los valores elevados de este parámetro sean resultado de contaminación antrópica local en cada pozo; es factible que esta contaminación esté ligada a infiltraciones desde pozos sépticos, vertimientos de aguas residuales domésticas o interacción con aguas superficiales contaminadas cercanas a los puntos, como es el caso de la quebrada San Antonio. De manera general se observa que las mayores concentraciones de nitratos se presentan al oeste de Tabatinga, en las inmediaciones a la quebrada San Antonio y al río Amazonas (Figura 102).

Este parámetro debe ser monitoreado regularmente, especialmente en los pozos donde se supera los 10 NO_3/l, valor máximo de nitrato permitido para aguas de consumo humano según la Resolución 2115 de 2007 de Colombia y la *Portaria* GM/MS n° 888/2021 de Brasil.

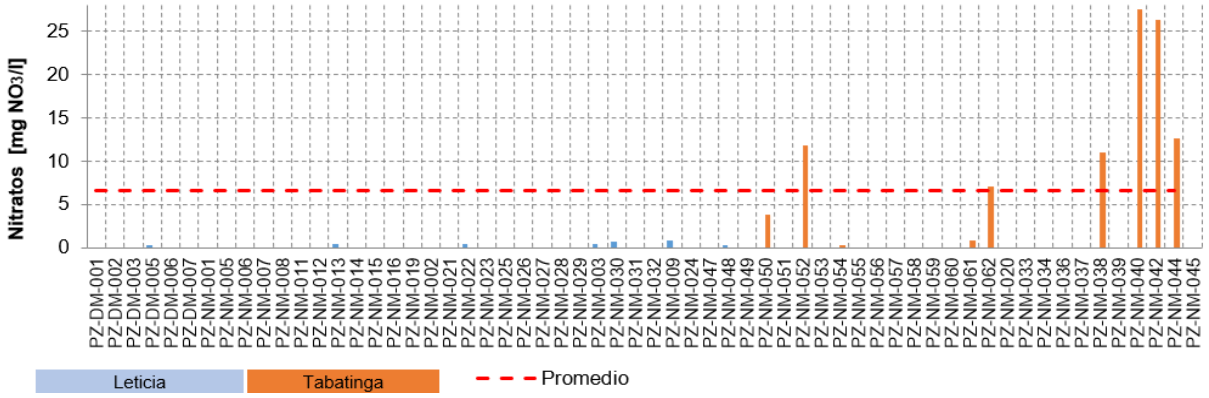


Figura 101. *Nitratos [mg NO_3/l] medidos en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

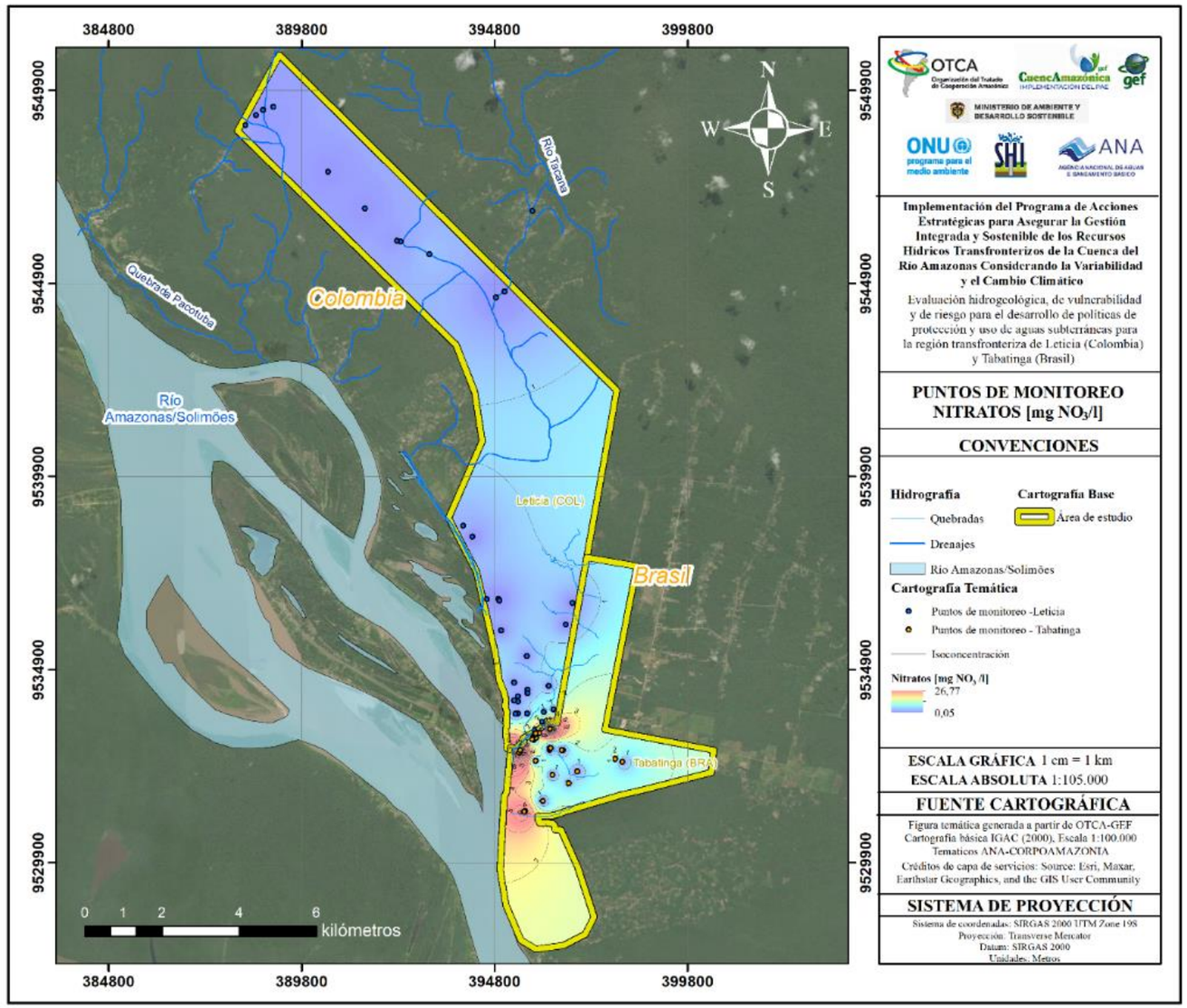


Figura 102. *Distribución espacial de las concentraciones de nitratos [NO3/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

Por su parte, los nitritos de todos los puntos monitoreados se encuentran por debajo del límite de detección (0,05 mg NO_2/l); esta diferencia entre nitritos y nitratos puede ser explicada debido a que la concentración de nitrito en el agua subterránea suele ser muy baja y a que este compuesto se oxida fácilmente a nitrato.

Los coliformes totales son un grupo de bacterias que son muy comunes en el ambiente y que no se presentan naturalmente en el agua subterránea, por lo tanto, pueden emplearse como un indicador de contaminación y de las condiciones sanitarias de la captación por aguas negras u otro tipo de desecho en descomposición. Los coliformes termotolerantes y E. Coli son subgrupos dentro de los coliformes totales que se originan en las heces de animales de sangre caliente.

Los coliformes termotolerantes en los puntos de monitoreo varían entre <1- 2.187 NMP/100 ml, de los cuales el 70% de los puntos registran valores inferiores al límite de detección (1 NMP/100 ml). A su vez, las mediciones de E. Coli varían entre <1-146 NMP/100 ml, donde el 78% de los pozos se caracterizan por presentar valores inferiores al límite de detección (1 NMP/100 ml); los mayores registros de este parámetro se presenten en los puntos PZ-NM-012 y PZ-NM-033, con 75 y 146 NMP/100 ml respectivamente.

Los valores de coliformes totales fluctúan entre <1- 41.060 NMP/100 ml, donde 48% de los puntos registran valores inferiores al límite de detección (1 NMP/100 ml); los puntos PZ-DM-007, PZ-NM-022, PZ-NM-023 y PZ-NM-049 se caracterizan por las mayores concentraciones de este parámetro, con valores superiores a los 8000 NMP/100 ml.

Según la Resolución 2115 de 2007 de Colombia y la *Portaria* GM/MS n° 888/2021 de Brasil, los coliformes totales deben estar ausentes en 100 ml para que el agua sea apta para consumo humano; cerca del 52% de los puntos monitoreados no son aptos para consumo según este parámetro. Sin embargo, cerca del 75% de los puntos son para uso doméstico y el porcentaje restante son para uso doméstico/industrial, doméstico/recreativo y doméstico/pecuario, en donde se acepta la presencia de coliformes en las aguas (CONAMA, 2008).

En la Tabla 68 se presentan los resultados de nitratos, coliformes totales, coliformes termotolerantes y E. Coli para los puntos que se encuentran por encima del límite de detección.

Tabla 68. *Nitratos, coliformes termotolerantes, coliformes totales y E. Coli en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Puntos	Nitratos (mg NO_3/l) (A)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 ml) (A)	Coliformes Totales (NMP/100 ml) (A)	Escherichia coli (NMP/100 ml) (A)
PZ-DM-001	<0,05	<1	111	<1
PZ-DM-005	0,24	3	4	<1
PZ-DM-007	<0,05	1.203	41.060	<1
PZ-NM-011	<0,05	<1	71	<1
PZ-NM-001	<0,05	108	4.352	10
PZ-NM-012	<0,05	120	166	75

Puntos	Nitratos (mg NO_3/l) (A)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 ml) (A)	Coliformes Totales (NMP/100 ml) (A)	Escherichia coli (NMP/100 ml) (A)
PZ-NM-013	0,42	<1	<1	<1
PZ-NM-015	<0,05	1	31	<1
PZ-NM-021	<0,05	<1	3	<1
PZ-NM-022	0,39	2.187	8.330	1
PZ-NM-023	<0,05	324	9.208	41
PZ-NM-027	<0,05	1	2	<1
PZ-NM-029	<0,05	1.733	2.603	29
PZ-NM-003	0,45	<1	<1	<1
PZ-NM-030	0,68	<1	6,3	<1
PZ-NM-032	<0,05	249	884	63
PZ-NM-009	0,89	<1	<1	<1
PZ-NM-024	<0,05	20	24	16
PZ-NM-047	<0,05	20	41	10
PZ-NM-048	0,33	3	57	4
PZ-NM-049	<0,05	233	19.863	62
PZ-NM-050	3,87	<1	<1	<1
PZ-NM-052	11,81	<1	<1	<1
PZ-NM-054	0,29	<1	<1	<1
PZ-NM-055	<0,05	<1	13	<1
PZ-NM-061	0,82	<1	122	<1
PZ-NM-062	7,03	<1	1	<1
PZ-NM-033	<0,05	272	1.236	146
PZ-NM-034	<0,05	52	160	41
PZ-NM-036	<0,05	146	171	10
PZ-NM-038	10,94	<1	10	<1
PZ-NM-040	27,54	<1	5	<1
PZ-NM-042	26,33	<1	1	<1
PZ-NM-044	12,69	<1	<1	<1
PZ-NM-045	<0,05	2	41	<1

- **Cloruros**

Los cloruros son muy solubles, estables en solución y difíciles de precipitar, no sufren oxidación ni reducción en aguas naturales y normalmente están asociados a iones de sodio. En las aguas subterráneas las altas concentraciones de cloruros son atribuibles a la disolución de depósitos

salinos, aguas muy antiguas (connatas o fósiles) o vertidos de efluentes de industrias químicas, intrusiones salinas, etc.

Su concentración en aguas de abastecimiento público constituye un estándar de aceptación, ya que provoca un sabor "salado" en el agua en altas concentraciones. Por ello, la Resolución 2115 de 2007 de Colombia y la *Portaria* GM/MS n° 888/2021 de Brasil establecen 250 mg Cl/l como el valor máximo permitido en aguas potables para el consumo humano.

En la zona de estudio los valores de cloruro en los pozos monitoreados oscilan entre <0.2 – 32,62 mg Cl/l, de los cuales el 16% de los puntos presentan concentraciones inferiores al límite de detección. Este parámetro muestra una clara diferencia entre las concentraciones registradas en los pozos de Leticia y en las registradas en Tabatinga (Figura 104). En Leticia las concentraciones de cloruros varían entre <0,2 – 7,84 mg Cl/l con un promedio de 1,89 mg Cl/l, mientras que en Tabatinga las concentraciones son mayores, oscilando entre <0,2 -32,6 mg Cl/l con un promedio de 6,77 mg Cl/l.

Esta ligera diferencia puede deberse a varios factores, el primero tiene que ver con que las líneas de flujo van en dirección Leticia Tabatinga, por lo tanto, puede haber un aumento de los cloruros en el sentido del flujo. Otra razón es que para el mantenimiento de los pozos es común que en la zona la comunidad emplee pastillas de cloro, que en el momento del muestreo pudo quedar registrado un aumento de Cl. Finalmente la última hipótesis que tampoco es comprobable con los datos disponibles, es que, el nivel acuífero que está captando los pozos de Tabatinga puede ser diferente al de Leticia, pero al no saber el diseño, la profundidad real de los pozos y la ubicación de la rejillas, no se podría saber si se está registrando agua diferente en ambas cuidades.

Los registros más elevados están asociados a los pozos PZ-NM-033, PZ-NM-038, PZ-NM-039, PZ-NM-040, PZ-NM-042, PZ-NM-044, PZ-NM-052, PZ-NM-053, PZ-NM-054, PZ-NM-059, PZ-NM-062.

En la Figura 103 se muestra la concentración de cloruros para los 60 pozos de monitoreo. Los puntos que no están graficados corresponden a aquellos donde la concentración se encuentra por debajo del límite de detección.

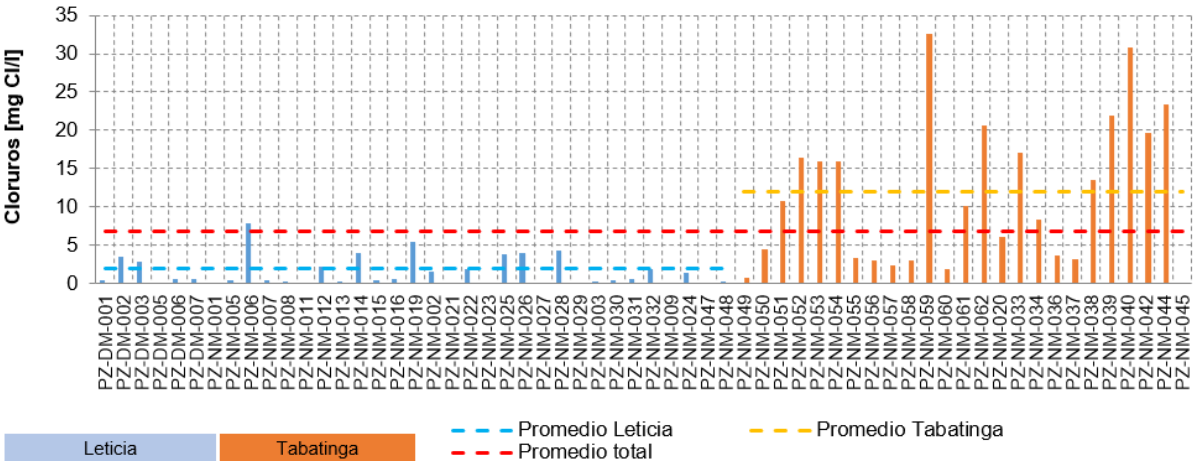


Figura 103. *Concentración de cloruro [mg Cl/l] en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

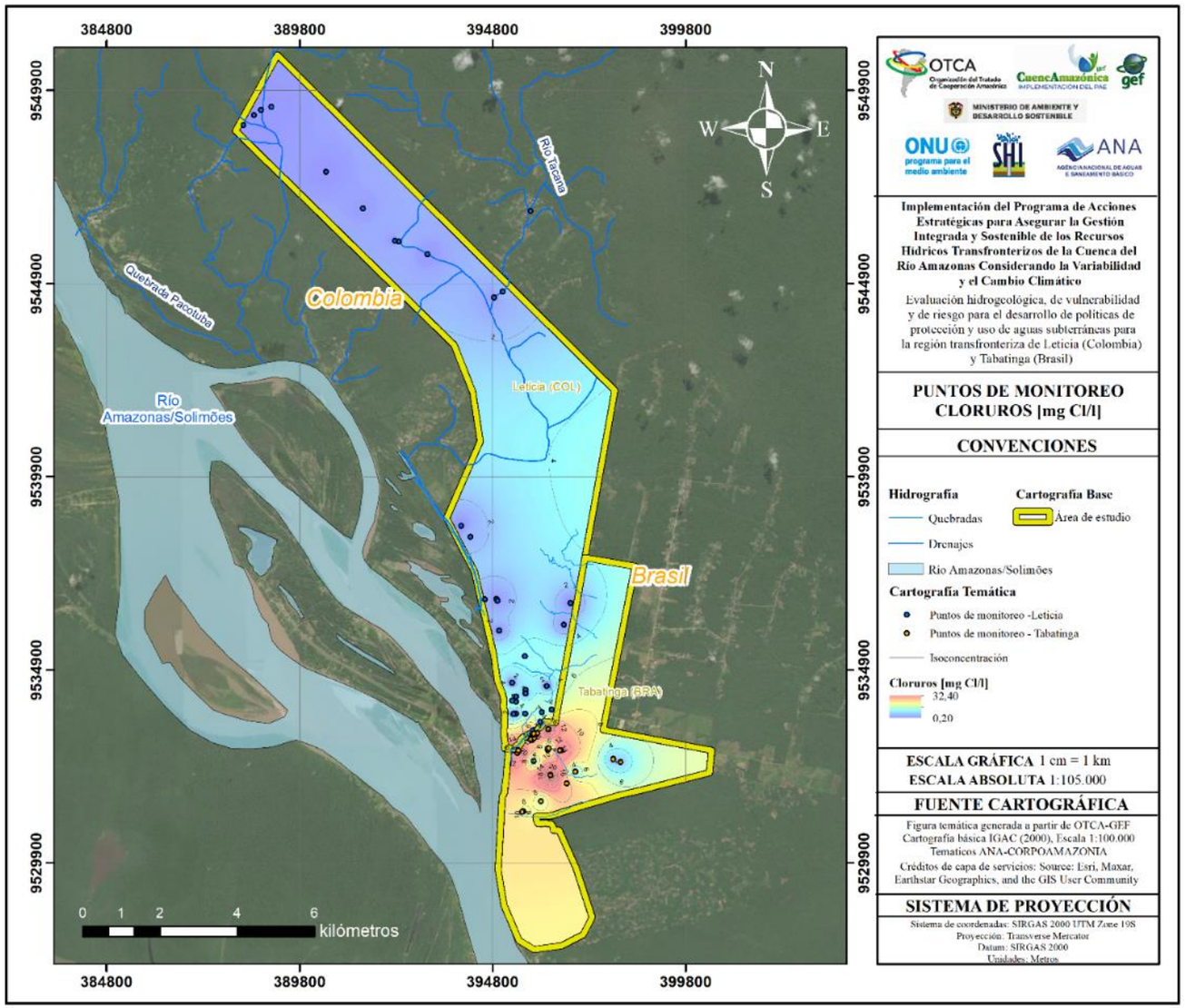


Figura 104. *Distribución espacial de las concentraciones de cloruros [mg Cl/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

Si bien hay un aumento de los cloruros en la región de Tabatinga, la mayoría de los puntos de monitoreo corresponden a aguas dulces, caracterizadas por bajas concentraciones de aniones (Cl^-, $HCO3^-$, SO_4^{2-}) y de sólidos disueltos. Únicamente los puntos PZ-NM-040, PZ-NM-054, PZ-NM-059, PZ-NM-061 y PZ-NM-062 presentan condiciones de aguas salobres, Figura 105. Sin embargo, se resalta que ninguno de los valores de cloruro obtenidos superó el límite establecido para consumo humano (250 mg Cl/l).

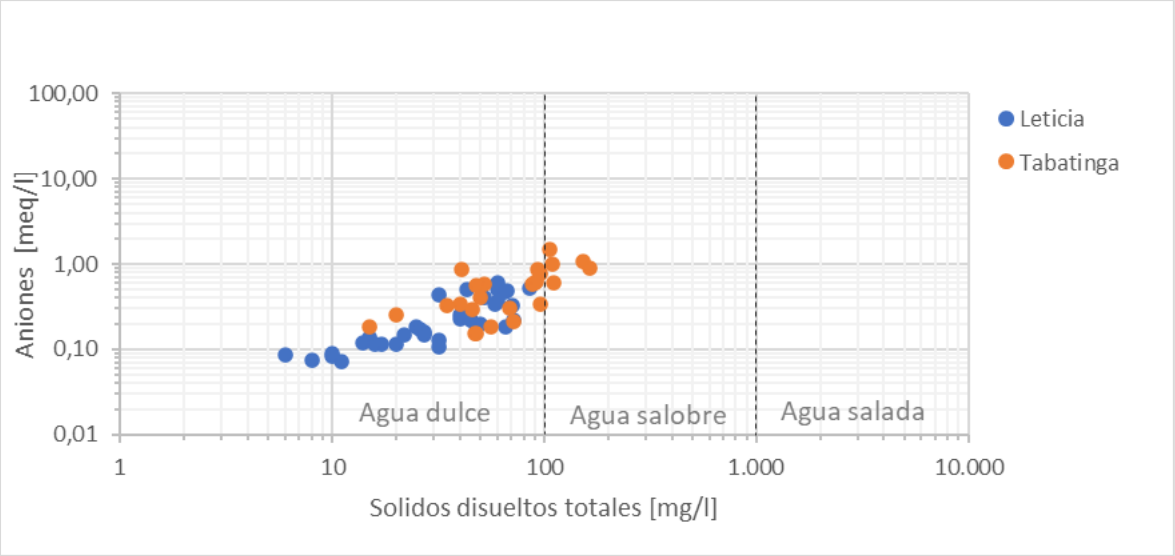


Figura 105. *Relación aniones (meq/l) y sólidos disueltos totales (mg/l) para los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Adicionalmente, la relación $rCl^-/rHCO_3^-$ también se puede emplear para determinar si hay intrusión de agua marina. En el caso de las aguas subterráneas de la zona de estudio esta relación presenta, en la mayoría de los casos, valores inferiores a 5 los cuales están asociados a aguas continentales. Sin embargo, la relación $rCl^-/rHCO_3^-$ en los puntos PZ-NM-042, PZ-NM-040 y PZ-NM-059 es de 8,6, 14,4 y 15,3 respectivamente, lo que puede ser debido a un aumento de cloruros por factores antrópicos. Además, y como se detallará más adelante (cap 9.5.3 - Hidrogeoquímica), hay una marcada diferencia entre las aguas de Leticia, donde predomina el ion HCO_3^- respecto a las de Tabatinga, donde el ion dominante es el Cl^-(Figura 106).

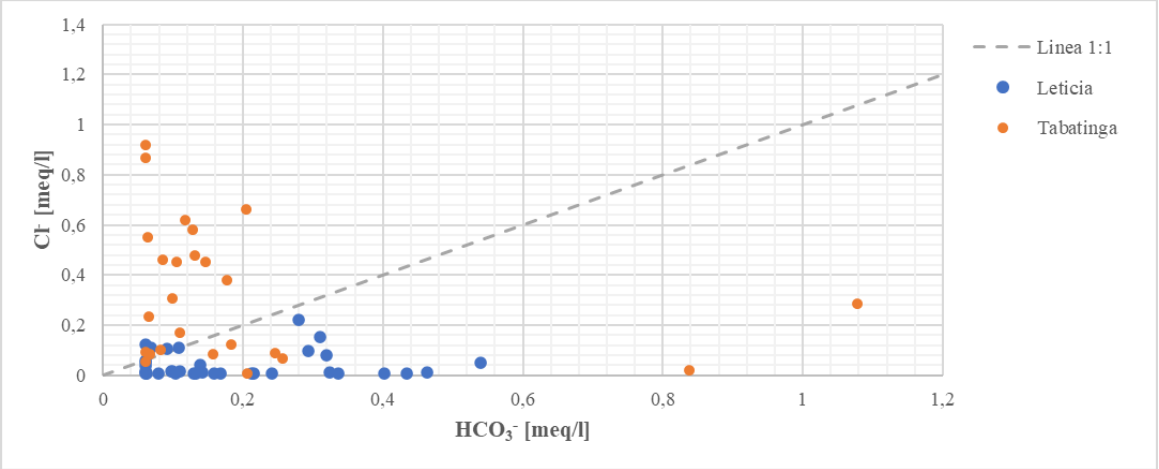


Figura 106. *Relación entre HCO_3^- y Cl^- en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

A partir de la Figura 107 se puede observar que la mayoría de los puntos analizados presentan rNa^+/rCl^- por encima de la línea teórica 1:1, lo que permite inferir que las aguas subterráneas en la zona de estudio tienen un exceso de concentración de Na^+, que puede provenir principalmente de la meteorización de silicatos. Sin embargo, esta relación se encuentra por debajo de la línea 1:1 en 10 puntos (PZ-NM-032, PZ-NM-031, PZ-NM-051, PZ-NM-033, PZ-NM-024, PZ-NM-034, PZ-NM-028, PZ-NM-059, PZ-NM-060 y PZ-NM-012) ubicados tanto en Leticia como en Tabatinga, lo que puede estar asociado a una mayor concentración de Cl^- debido a factores antrópicos.

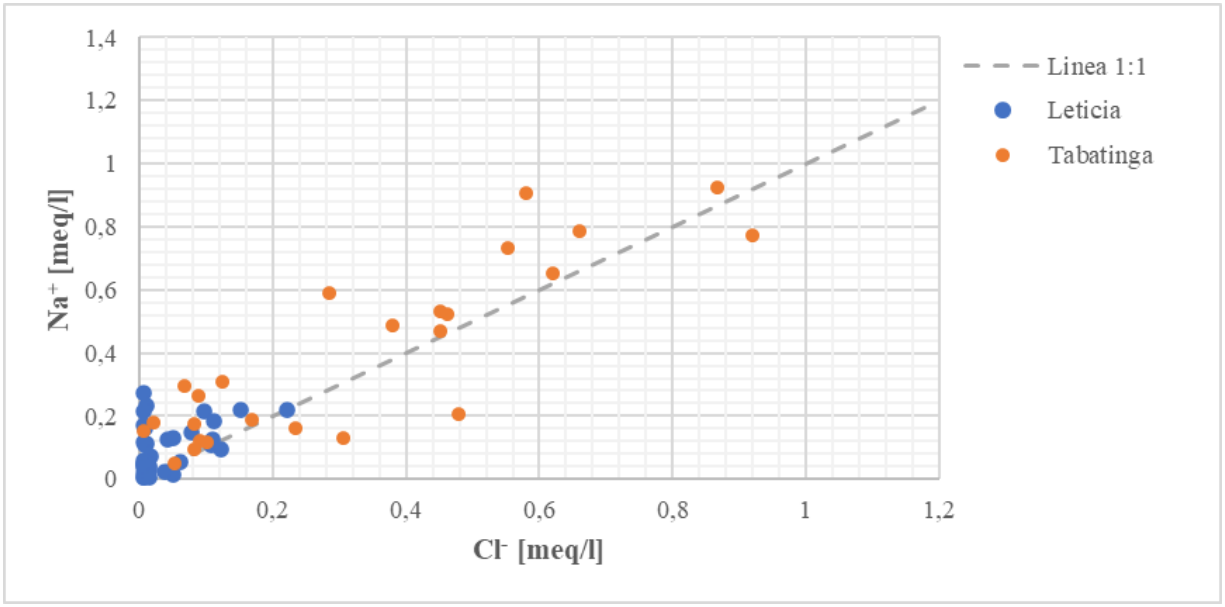


Figura 107. *Relación entre Cl^- y Na^+ en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Por su parte, se observa que en la mayoría de los puntos que presentan altas concentraciones de cloruro también registran altas concentraciones de nitratos, como es el caso de los pozos PZ-NM-

038, PZ-NM-040, PZ-NM-042, PZ-NM-044, PZ-NM-052 y PZ-NM-062; es factible que las concentraciones de cloruros en estos puntos estén evidenciando procesos de contaminación antrópica.

- **Calcio y magnesio**

El calcio es el más abundante de los metales alcalinotérreos y suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. En la zona de estudio las concentraciones de calcio disuelto en las aguas subterráneas varían entre <0,15-6,24 mg/l, con un promedio de 1,32 mg/l (Figura 108 y Figura 109).

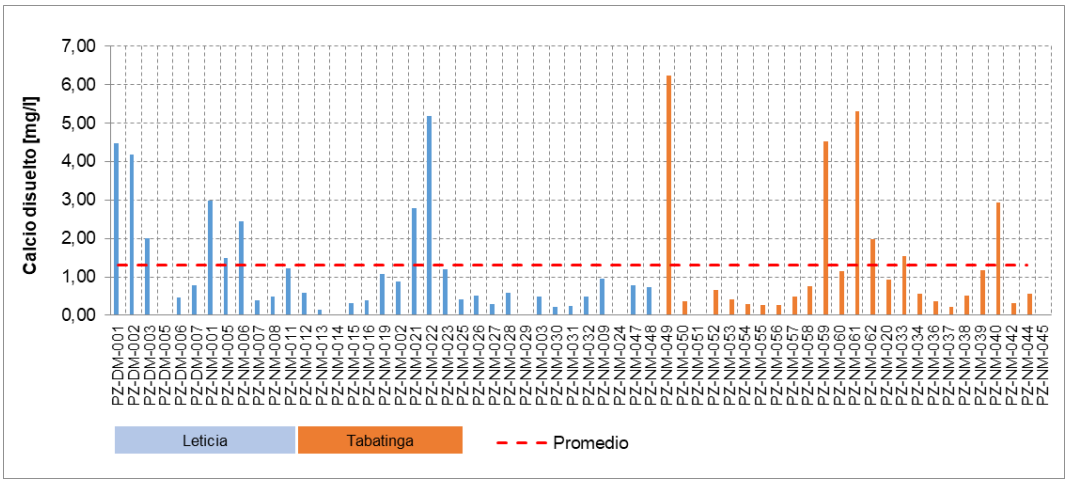


Figura 108. *Concentración de calcio disuelto [mg Ca/l] en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

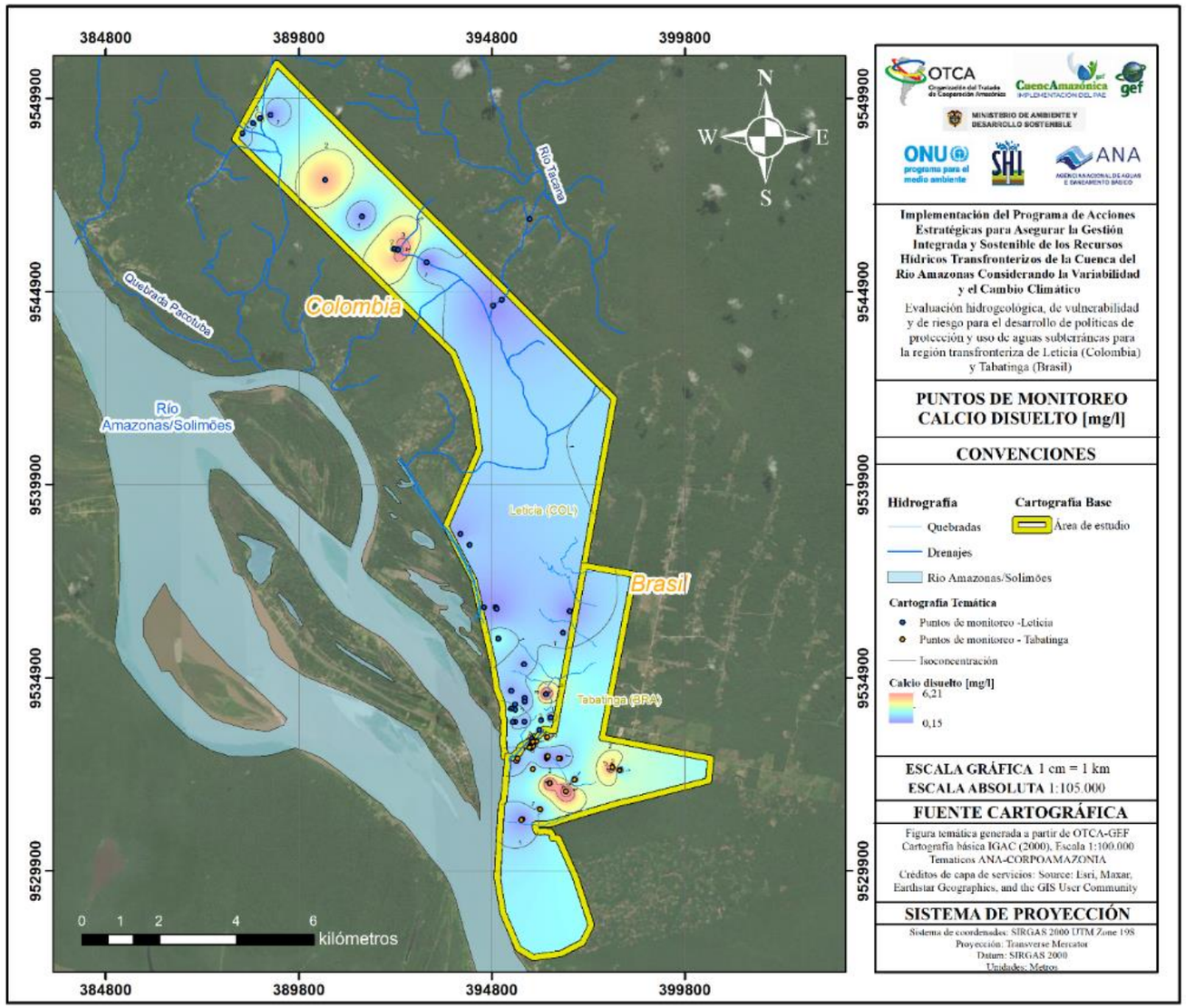


Figura 109. *Distribución espacial de las concentraciones de calcio [mg Ca/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

El magnesio, debido a su solubilidad, generalmente se encuentra en el agua natural, pero en concentraciones más bajas que el calcio. El ion magnesio (Mg^{2+}) tiene propiedades similares a las del ion calcio y en algunos aspectos de la química del agua, se puede considerar que el calcio y el magnesio tienen efectos similares, ya que contribuyen a la propiedad de dureza (Figura 110 y Figura 111).

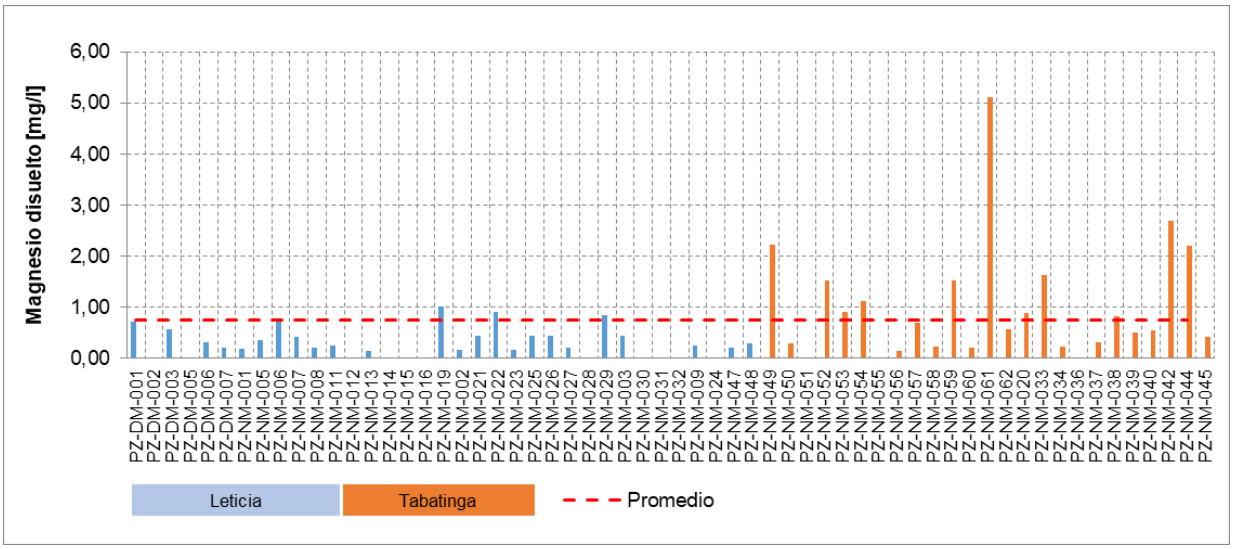


Figura 110. *Concentración de magnesio [mg/l] en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023)*

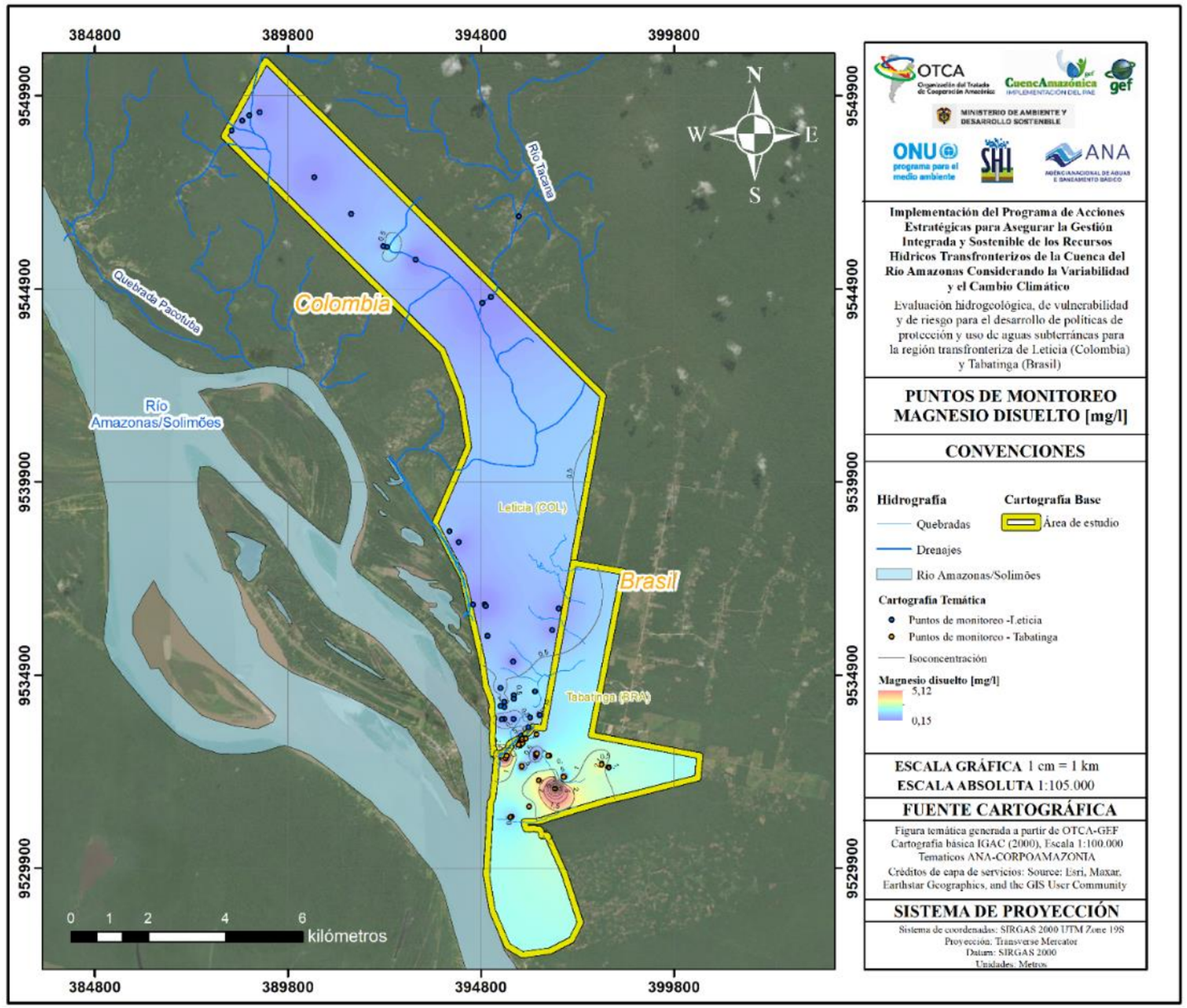


Figura 111. *Distribución espacial de las concentraciones de magnesio [mg Ca/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

Las aguas continentales se caracterizan por una la relación rMg^{2+}/rCa^{2+} que oscila entre 0,3 -1,5 mientras que para las aguas marinas esta relación es cercana a 5 (Custodio & Llamas, 1975). Para el caso de los puntos de monitoreo, la relación rMg^{2+}/rCa^{2+} varía entre 0,06 – 13,9 con un valor promedio de 1,6; donde la mayoría de los puntos se caracterizan por presentar valores típicos de aguas continentales. Sin embargo, los puntos PZ-NM-044, PZ-NM-054, PZ-NM-029 y PZ-NM-042 presentan valores anómalos superiores a 6. En estos casos las concentraciones de magnesio elevadas pueden estar asociadas a la presencia de niveles de agua más antiguos y confinados; no obstante, esto no es posible determinarlo con certeza, al no conocer con detalle el diseño de los pozos o la ubicación de la rejilla.

En general, se observa que las aguas en Tabatinga presentan valores más elevados de esta relación que las aguas en Leticia (Figura 112). Esta diferencia puede ser explicada debido a que la concentración de magnesio tiende a incrementarse a lo largo de la ruta del flujo de agua subterránea (que en este caso su dirección predominante es en sentido norte a sur), hasta alcanzar las mayores relaciones rMg^{2+}/rCa^{2+} en Tabatinga.

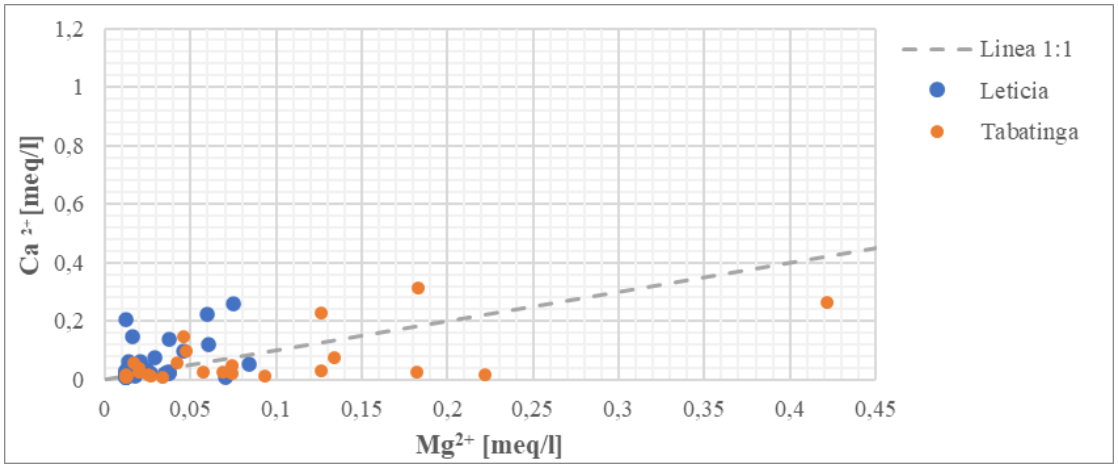


Figura 112. *Relación entre Mg^{2+} y Ca^{2+} en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Por su parte, la relación $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ vs HCO_3^- se usa con frecuencia para confirmar la erosión de las rocas o el intercambio catiónico como el proceso de control dominante de la calidad del agua subterránea; valores por encima de la línea estequiométrica 1:1 indican el predominio de los iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} sobre el HCO_3^- causado por la meteorización de las rocas o el intercambio catiónico, y por debajo se asocia con la liberación de HCO_3^- en las aguas subterráneas provocada por la interacción de minerales de feldespato con ácido carbónico (H_2CO_3) (Gugulothu, Subbarao, Das, & Dhakate, 2022). En este caso se puede observar que las muestras de Leticia y la mayoría de las muestras de Tabatinga presentan un exceso de HCO_3^-, Figura 113.

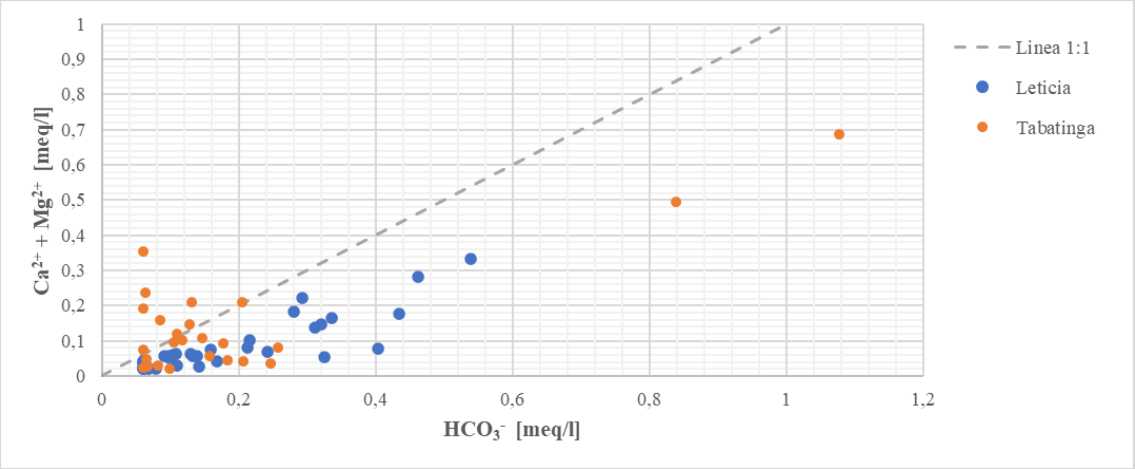


Figura 113. *Relación entre Ca^{2+} + Mg^{2+} vs HCO_3^- en los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

- **Hierro y manganeso**

El hierro es un constituyente normal en el organismo humano, por lo general, sus sales no son tóxicas en las cantidades comúnmente encontradas en las aguas naturales; sin embargo, la presencia de hierro puede afectar el sabor del agua y producir manchas indelebles sobre los artefactos sanitarios y ropa blanca.

Según los resultados de hierro total para los puntos que conforman la red de monitoreo, este parámetro oscila entre <0,09- 6,04 mg/l con un promedio de 1,25 mg/l, por lo que se logran evidenciar procesos de disolución de hierro en las aguas subterráneas de la zona de estudio, especialmente en la zona norte de Leticia (Figura 115). Las mayores concentraciones se presentan en los puntos PZ-DM-001, PZ-DM-003, PZ-NM-001, PZ-NM-021, PZ-NM-047 y PZ-NM-049, (Figura 114).

Además, se puede evidenciar que, en 10 de los puntos de monitoreo, las concentraciones de hierro superan el valor máximo permitido de 0,3 mg/l para consumo humano, acorde a lo establecido en la Resolución 2115 de 2007 de Colombia y la *Portaria* GM/MS n° 888/2021 de Brasil.

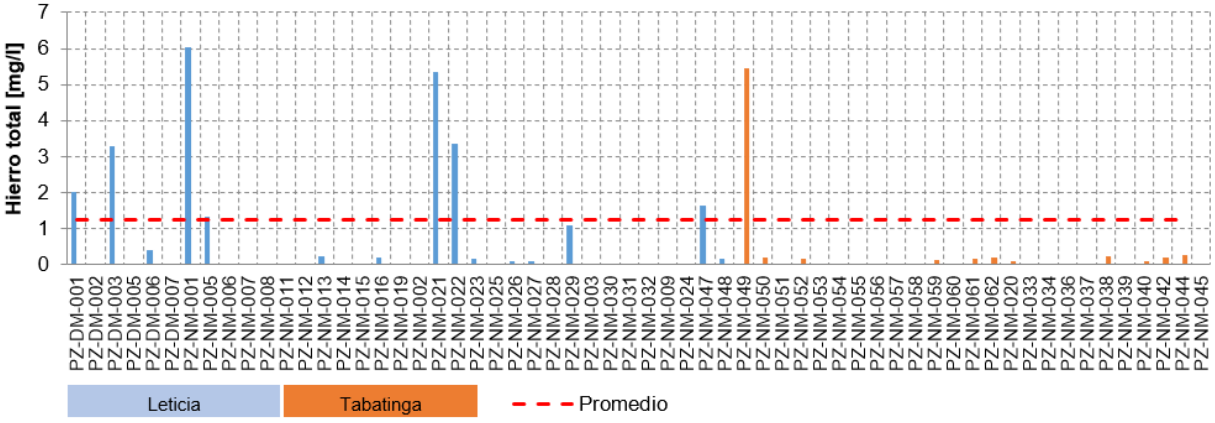


Figura 114. *Concentración de hierro total [mg/l]en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

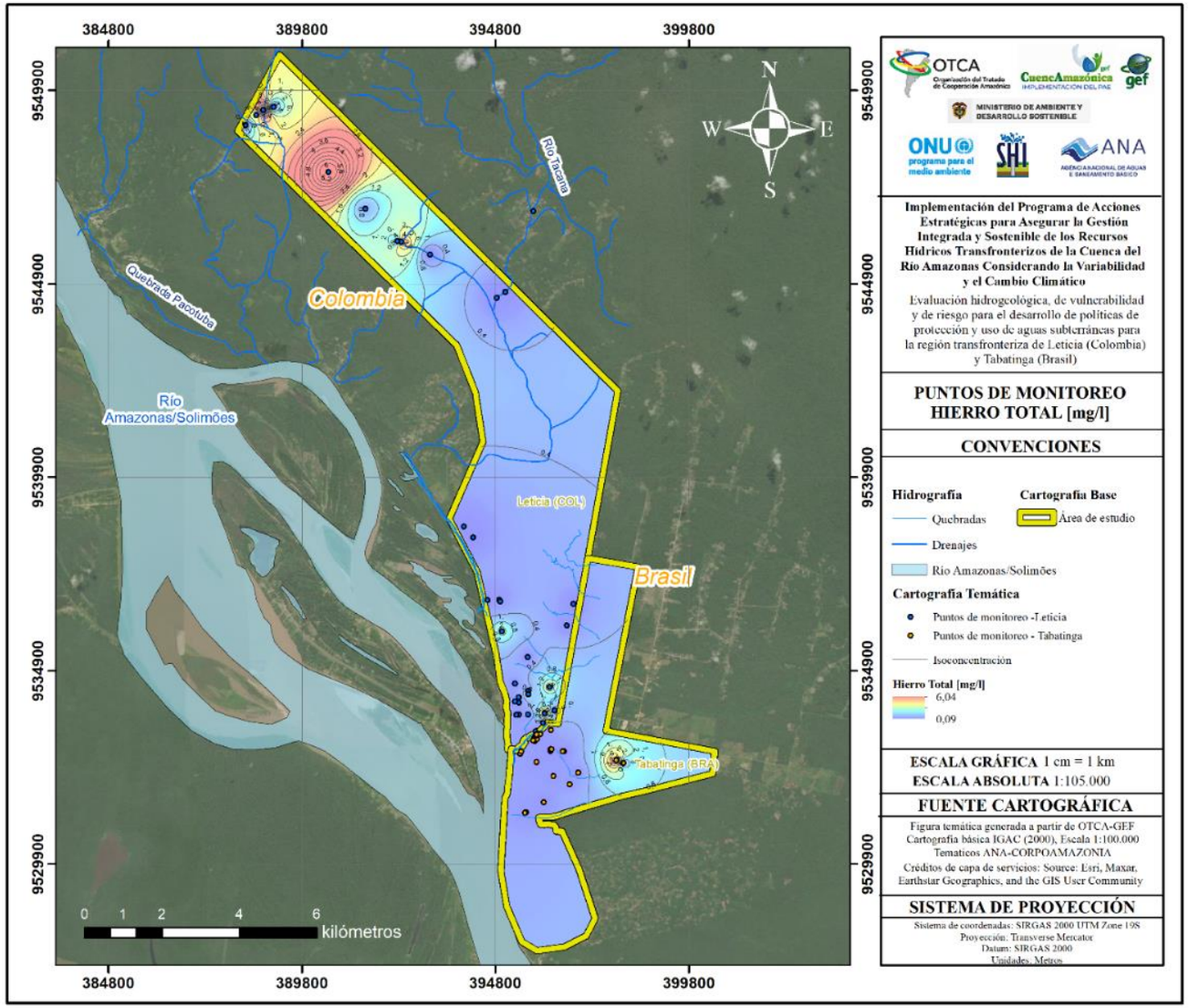


Figura 115. *Distribución espacial de las concentraciones de hierro total [mg/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

El manganeso es un elemento esencial para la vida animal; funciona como un activador enzimático. Sin embargo, grandes dosis de manganeso en el organismo pueden causar daños en el sistema nervioso central. En concentraciones superiores a 0,1 miligramo por litro también mancha las instalaciones de plomería y la ropa lavada, y produce en las bebidas un sabor desagradable. Su presencia no es común en el agua, pero cuando se presenta, por lo general está relacionado con el hierro.

En la zona de estudio los valores de manganeso en los pozos monitoreados varían entre <0.003 – 0,41 mg/l, de los cuales el 20% de los puntos presentan concentraciones inferiores al límite de detección (Figura 116). Es posible observar diferencia entre las concentraciones registradas en los pozos de Leticia y en las registradas en Tabatinga (Figura 117). En Leticia las concentraciones de manganeso oscilan entre <0,003 – 0,096 mg/l con un promedio de 0,022 mg/l, mientras que en Tabatinga las concentraciones son superiores, variando entre <0,003 -0,41 mg/l con un promedio de 0,077 mg/l. Los registros más elevados están asociados a los pozos PZ-NM-049, PZ-NM-055, PZ-NM-059, PZ-NM-042, PZ-NM-044, en los cuales se supera las concentraciones máximas permitidas para consumo humano (0,1 mg/l), según lo definido en la Resolución 2115 de 2007 y la *Portaria* GM/MS n° 888/2021.

Es probable que las concentraciones de hierro y manganeso evidenciadas en los puntos de monitoreo estén asociadas a disolución de óxidos de hierro y manganeso presentes en el Terciario Inferior Amazónico (INGEOMINAS, 2000). Sin embargo, es posible que en el caso del punto PZ-NM-059 las altas concentraciones de manganeso se deban a factores de contaminación antrópica, como actividades industriales y la quema de combustibles fósiles, debido a que las condiciones sanitarias de este punto son deficientes: no cuenta con una cubierta adecuada, un sello sanitario, un piso de cemento y una cerca alrededor de la captación, lo que facilita la entrada de contaminantes.

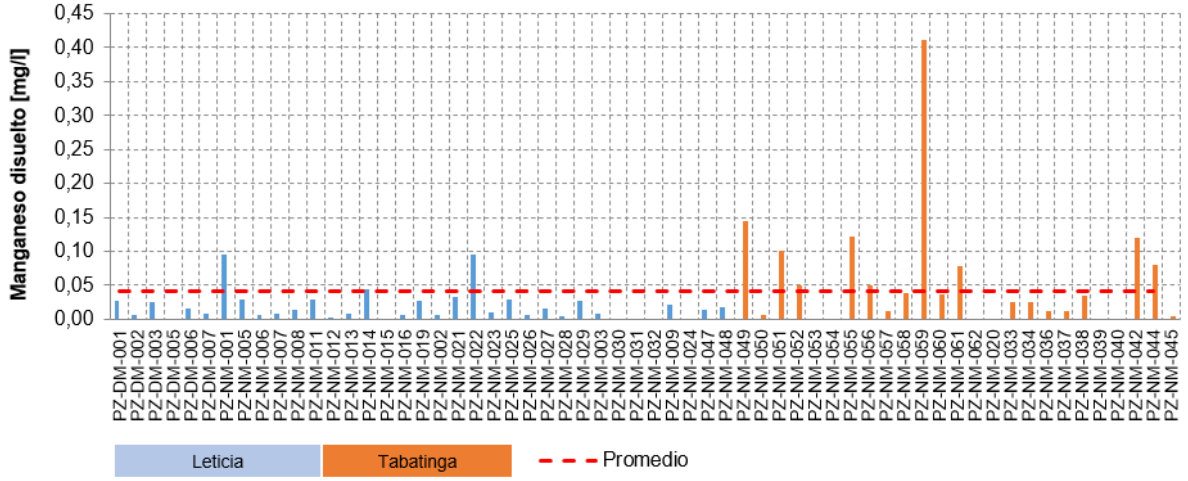


Figura 116. *Concentración de manganeso [mg/l] en los puntos de monitoreo. Los puntos sin graficar se encuentran por debajo del límite de detección. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

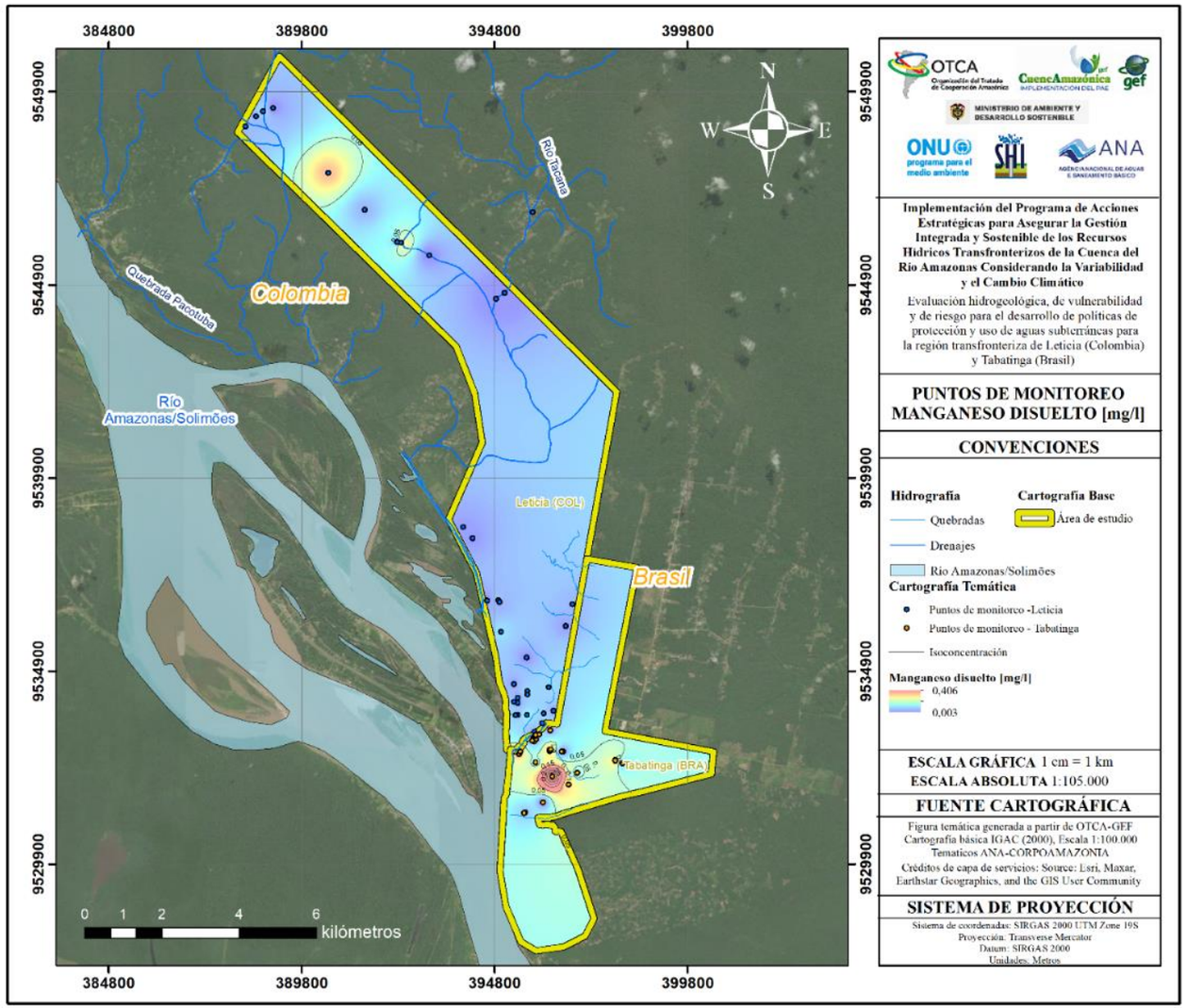


Figura 117. *Distribución espacial de las concentraciones de manganeso [mg/l]. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

Con el fin de relacionar los resultados obtenidos en la campaña de monitoreo con la normativa de cada país, se analizó el cumplimiento o no, respecto al valor límite de cada parámetro muestreado para cada uso en los 60 puntos, de acuerdo con el decreto 1076 de 2015 (Republica de Colombia, 2015) y la resolución 2115 de 2007 (MPS & MAVDT, 2007), y la resolución CONAMA n° 396, del 3 de abril de 2008 y la *Portaria* GM/MS n° 888/2021 para Brasil (Ministério da Saúde, 2021; CONAMA, 2008).

En general, de los 60 puntos de monitoreo, los 35 puntos ubicados en la ciudad Leticia cumplen con la normativa en la mayoría de los parámetros, presentado únicamente valores por debajo del límite en pH y por encima en turbidez, hierro y manganeso disuelto y total, en algunos puntos la presencia de coliformes termotolerantes.

De estos 35 puntos de monitoreo en Leticia, 21 están asociados con uso doméstico, de los cuales 5 (24%) cumplen con todos los parámetros establecidos por la normativa Colombia y 16 (76%) superan el valor límite de la norma en por lo menos uno de los parámetros y, por lo tanto, es probable que el agua requiera de un tratamiento convencional antes de ser empleada. La distribución porcentual se resume en la Figura 118.

Por su parte, ninguno de los puntos destinados para consumo humano cumple con la normativa colombiana debido a los bajos valores de pH registrados (<6,5 unidades de pH); no obstante, de los 12 puntos de monitoreo que son empleados para este fin, el 50% cumple con lo establecido en normativa para el resto de los parámetros analizados en este estudio y el 50% restante presenta valores altos en parámetros como turbiedad, hierro, coliformes termotolerantes y E-Coli., tal como se presenta en la Figura 119.

Es importante adicionar al análisis que, de los dos puntos restantes en Leticia, el punto de uso industrial (PZ-NM-03) cumple con la normativa para su uso y el faltante se encuentra abandonado. En el **Anexo_05_CalidadAgua** se encuentra los resultados de laboratorio para cada uno de los puntos de monitoreo, donde se podrá analizar de manera más detallada esta información.

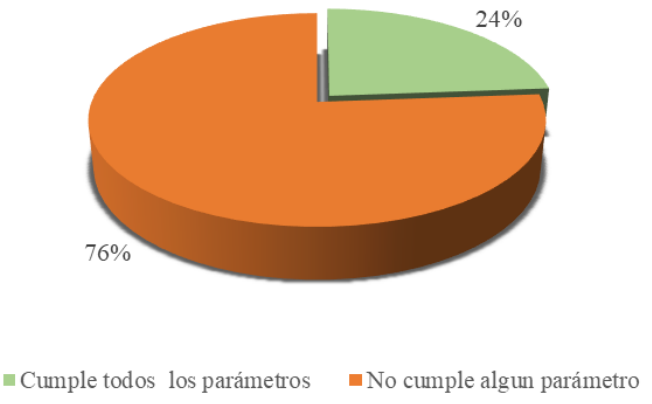


Figura 118. *Distribución porcentual para uso doméstico. Decreto 1076 de 2015 y la resolución 2115-2007. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

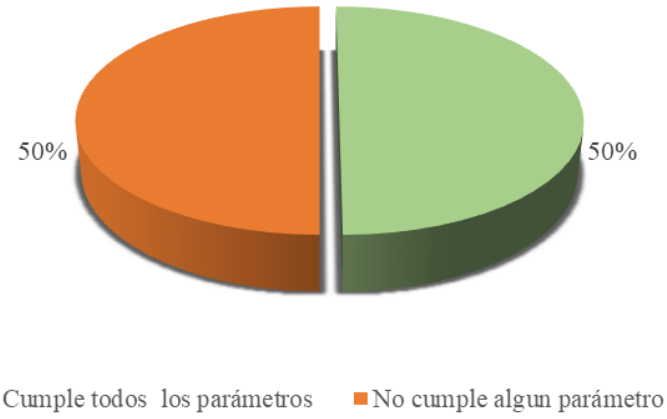


Figura 119. *Distribución porcentual para uso doméstico colectivo. Decreto 1076 de 2015 y la resolución 2115-2007. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Para el caso de los 25 puntos de monitoreo de la ciudad de Tabatinga, se superan los valores limites en la mayoría de los pozos, principalmente en los parámetros de turbidez, hierro y manganeso total y disuelto, y la presencia de coliformes y E-Coli en algunos de los puntos.

De estos 25 puntos de monitoreo, 23 están asociados a usos domésticos en Tabatinga, donde el 70% de los pozos superan el valor límite en alguno de los parámetros y 7 pozos, equivalentes al 30%, cumplen con la normativa brasileña, tal como se resume gráficamente en la Figura 120. Los dos puntos restantes en el análisis presentan usos industriales, destacando que para el caso del PZ-NM-59 se incumple la normativa por exceso de manganeso total y el PZ-NM-37 si cumple con la normativa.

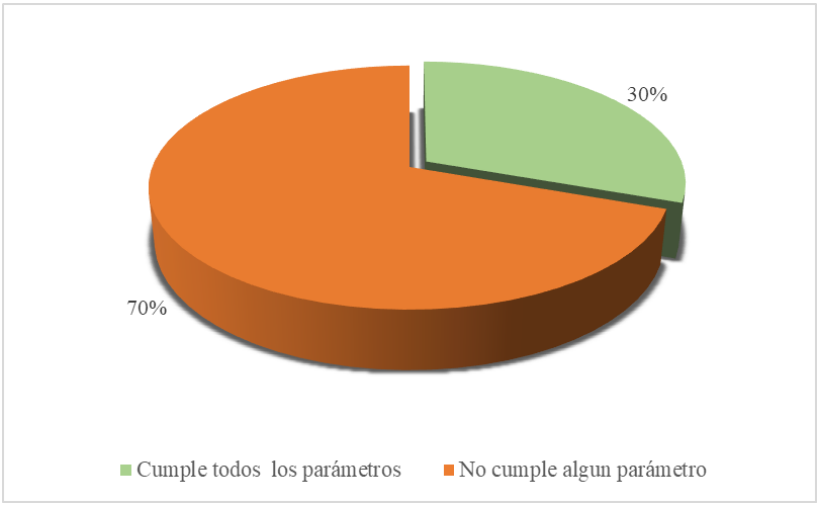


Figura 120. *Distribución porcentual para consumo humano y uso doméstico. Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

9.5.3. Hidrogeoquímica

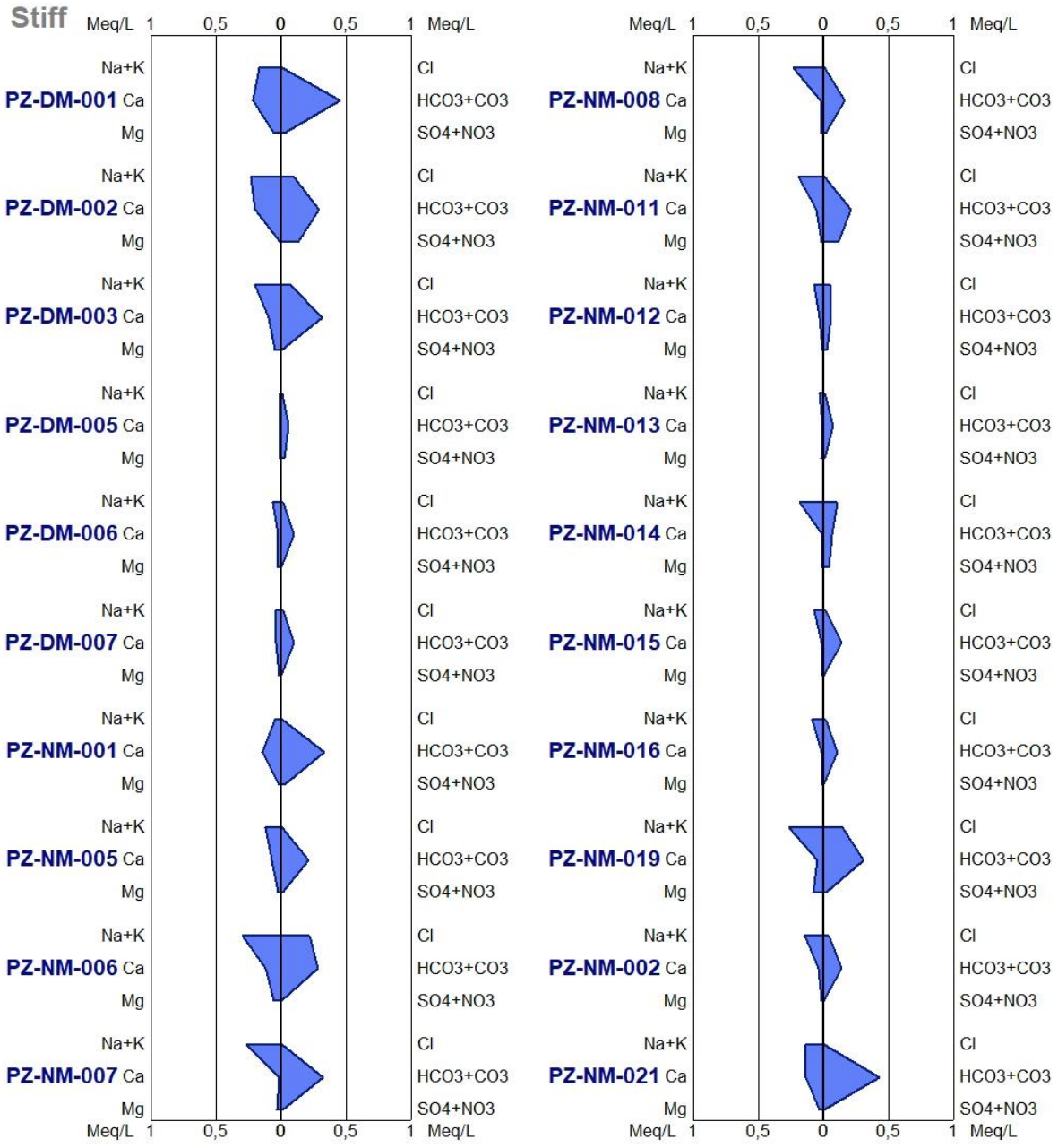
- **Diagramas de Stiff**

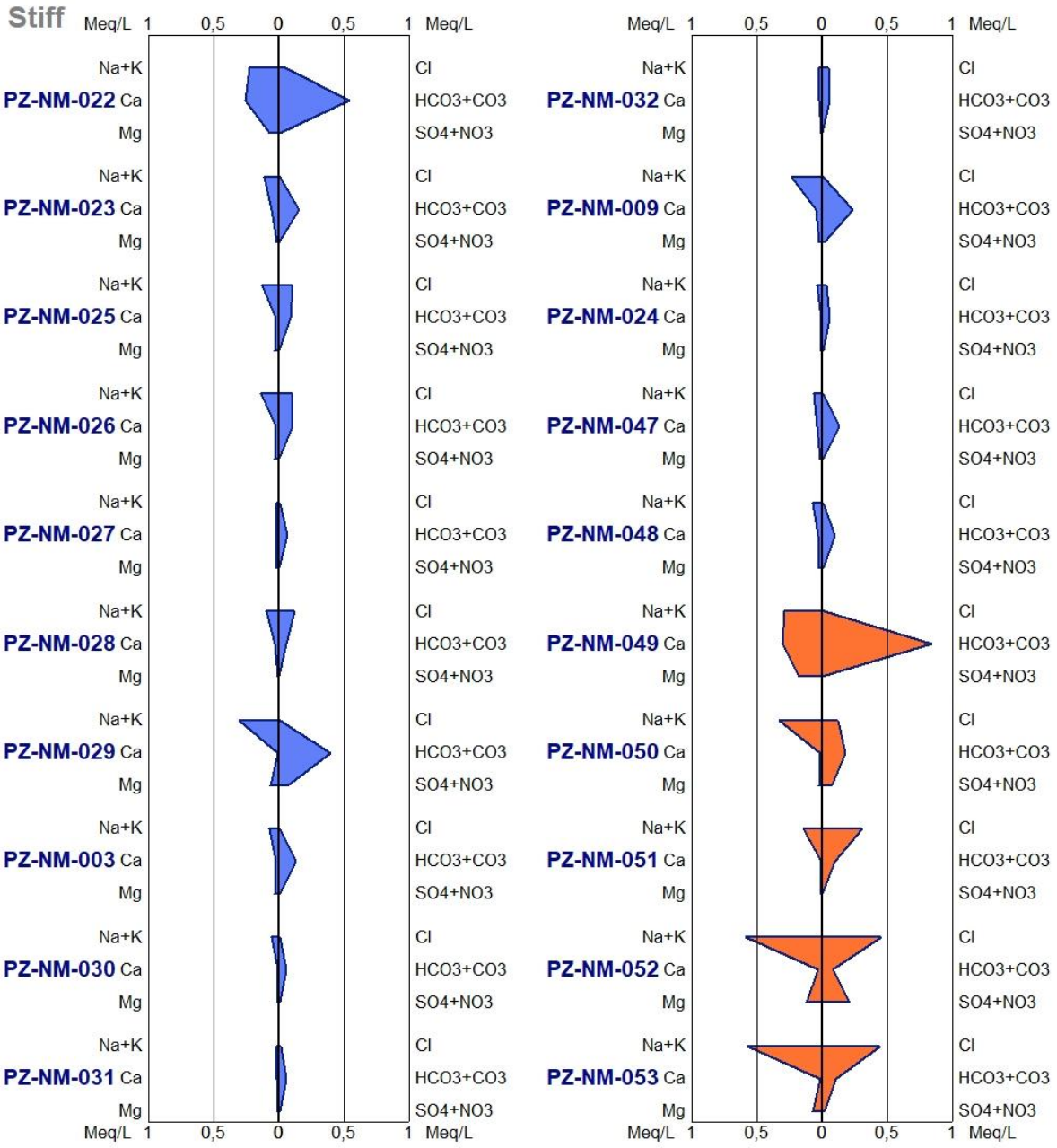
El diagrama de Stiff es una representación gráfica del análisis químico; estos diagramas son polígonos que se forman uniendo vértices, que corresponden a los valores de la concentración de los iones en miliequivalentes por litro medidos desde el eje central. A la derecha del eje se da la escala de medida de los aniones y a la izquierda la de los cationes. Aguas de orígenes distintos revelarán diferentes formas de polígonos, por ejemplo, las aguas con pocos sólidos disueltos presentan diagramas de Stiff más achatados que las muestras cuyos sólidos disueltos son mayores (Fitts, 2002). Este diagrama se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en los campos de la hidrogeología y la geoquímica para demostrar la composición de iones principales de una muestra de agua.

En la Figura 121 se presentan los diagramas de Stiff para las muestras analizadas en este trabajo. Según este diagrama, las aguas de Leticia se caracterizan por un bajo grado de mineralización, con tendencia a una fase bicarbonatada, lo que puede tener una estrecha relación con agua de recarga reciente o con flujos de agua subterránea con periodos de residencia cortos en el medio subterráneo. Los puntos con mayor contenido de bicarbonatos corresponden a PZ-NM-021 y PZ-NM-022, localizados al norte de la zona de estudio y PZ-DM-001 y PZ-NM-029, ubicados al sur de la zona urbana de Leticia.

En contraste, las aguas de Tabatinga se presentan con un mayor grado de mineralización, en las cuales predomina el contenido de iones de cloruro y de sodio-potasio y donde las concentraciones más elevadas se evidencian en los puntos PZ-NM-040, PZ-NM-042, PZ-NM-044, PZ-NM-059 y PZ-NM-062; los puntos de monitoreo restantes, si bien exhiben concentraciones menores, mantienen la misma tendencia, con predominio de iones de cloruro y sodio-potasio, exceptuando los puntos PZ-NM-049 y PZ-NM-061, los cuales se caracterizan por una mayor concentración de bicarbonato.

Este comportamiento de los Stiff es consecuente con lo que se mencionó previamente, en el análisis de los cloruros, donde se observa que, en el sentido del flujo hacia Tabatinga, las aguas parecen aumentar las magnitudes de algunos parámetros (CE, SDT, iones mayoritarios); sin embargo, no se descarta que puntualmente algunos de esos aumentos estén relacionados con contaminación de origen antrópico.


Stiff
Meq/L 1 0,5 0 0,5 1 Meq/L
Na+K
Ca
Mg
Cl
HCO3+CO3
SO4+NO3
PZ-DM-001
PZ-DM-002
PZ-DM-003
PZ-DM-005
PZ-DM-006
PZ-DM-007
PZ-NM-001
PZ-NM-005
PZ-NM-006
PZ-NM-007
PZ-NM-008
PZ-NM-011
PZ-NM-012
PZ-NM-013
PZ-NM-014
PZ-NM-015
PZ-NM-016
PZ-NM-019
PZ-NM-002
PZ-NM-021


Stiff
Meq/L 1 0,5 0 0,5 1 Meq/L
Na+K
Ca
Mg
Cl
HCO3+CO3
SO4+NO3
PZ-NM-022
PZ-NM-023
PZ-NM-025
PZ-NM-026
PZ-NM-027
PZ-NM-028
PZ-NM-029
PZ-NM-003
PZ-NM-030
PZ-NM-031
PZ-NM-032
PZ-NM-009
PZ-NM-024
PZ-NM-047
PZ-NM-048
PZ-NM-049
PZ-NM-050
PZ-NM-051
PZ-NM-052
PZ-NM-053

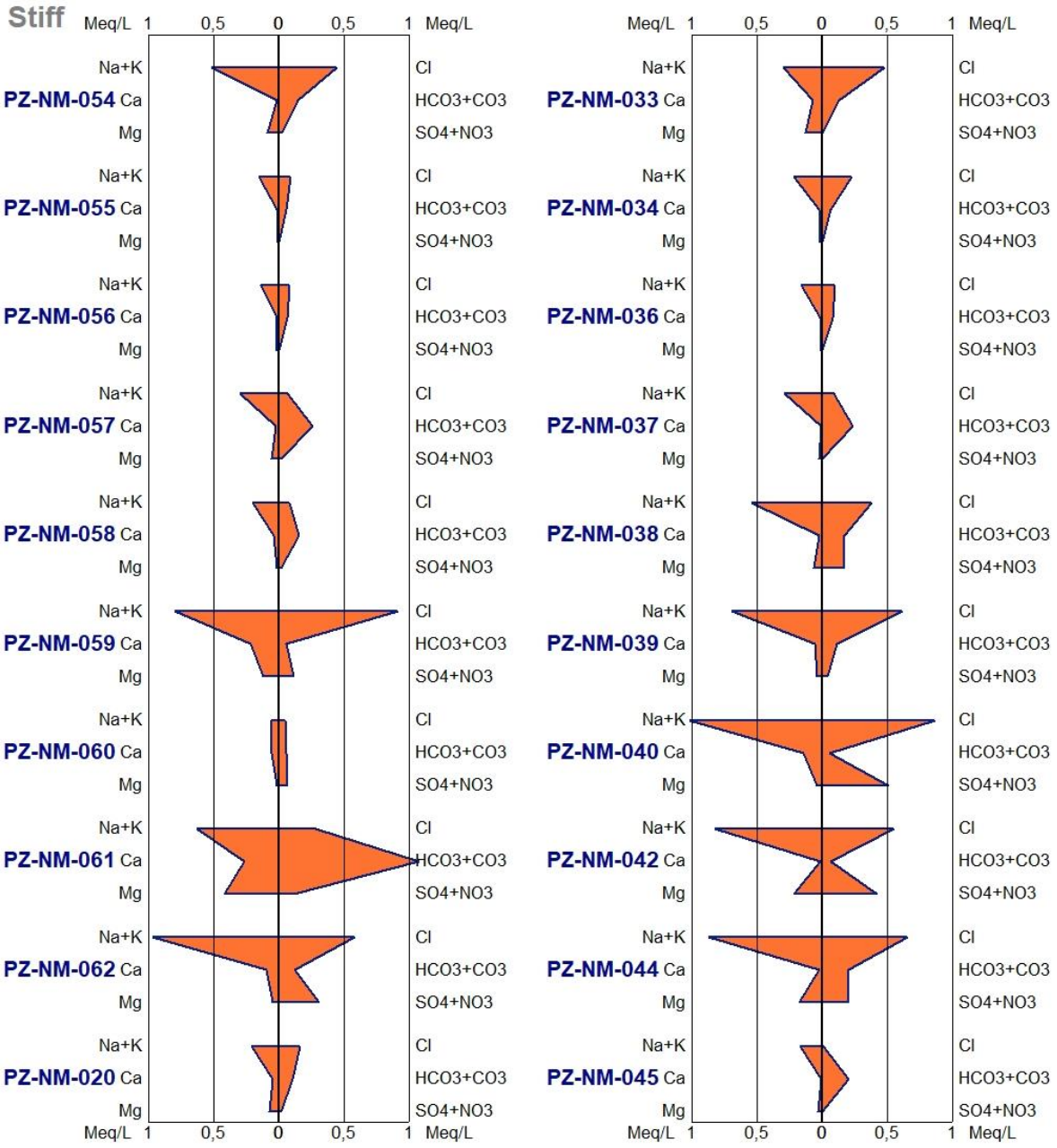


Figura 121. *Diagrama de Stiff. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

- **Diagramas de Piper**

El diagrama de Piper se utiliza para clasificar el agua, con el fin de determinar su calidad, a través de dos diagramas separados para representar los aniones y cationes, con un campo central romboidal donde se representan en conjunto los aniones y los cationes. En estos, las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas y se puede realizar una clasificación química del agua (Freeze & Cherry , 1979).

En la Figura 122 se presenta el diagrama de Piper, mediante el cual se puede determinar una clara diferencia entre las aguas de Leticia y las aguas de Tabatinga, similar a lo observado en los diagramas de Stiff. En Leticia el 74,3% de los puntos de monitoreo tienen como catión dominante el sodio-potasio, mientras que el 22,8% no presenta un catión dominante y únicamente el punto PZ-NM-001 tiene como catión predominante el calcio. Por su parte, el bicarbonato corresponde al anión dominante, registrado en el 85,7% de los puntos, mientras que el cloruro es dominante únicamente en el 11,4% y solamente el punto PZ-NM-012 no tiene ningún anión dominante.

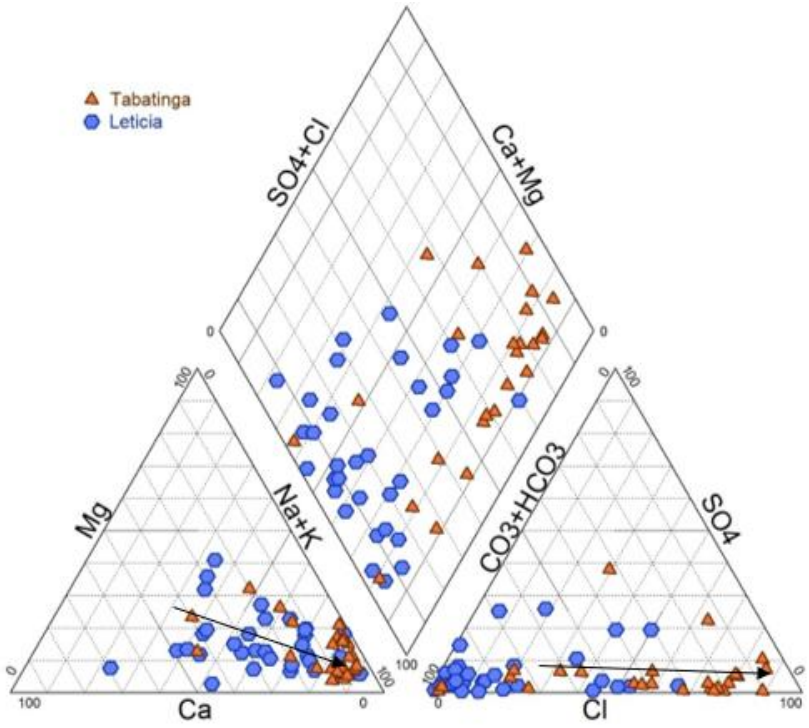


Figura 122. *Diagrama de Piper para las muestras de la red de monitoreo preliminar. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Comparativamente, aunque los cationes en Tabatinga presentan una tendencia similar a lo registrado en Leticia, donde el 88% tiene como catión dominante el sodio-potasio y el 12% no tiene ningún catión dominante, se observa una diferencia marcada en el comportamiento de los aniones. El anión principal en los puntos de Tabatinga es el cloruro, predominando en el 68% de las muestras, mientras que el anión bicarbonato solo representa el 28% y únicamente el punto PZ-NM-060 no presenta anión dominante.

Se resalta el bajo contenido de sulfatos tanto en las aguas subterráneas de Leticia como en las Tabatinga, exceptuando el punto PZ-NM-060.

De esta forma, los puntos de la red de monitoreo preliminar se pueden agrupar en dos grupos principales. El primer grupo corresponde a aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas (18,3%) y bicarbonatadas sódicas (43,3%), las cuales se localizan principalmente en Leticia y corresponden al 61,6% del total de los pozos monitoreados. El segundo grupo corresponde a aguas cloruradas sódicas, abarcando el 36,6% de los puntos, los cuales se ubican de manera preferencial en Tabatinga; estos dos grupos están reflejando el empobrecimiento de las aguas en bicarbonato y el enriquecimiento en cloruro a medida que el flujo natural del agua progresa en el medio subterráneo. Así mismo, se observa que está ocurriendo intercambio catiónico en la medida que las muestras pierden Ca y aumentan Na. En la Tabla 69 se presenta la clasificación para cada punto de monitoreo.

Tabla 69. *Clasificación de las aguas subterráneas de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Punto	Catión dominante	Anión dominante	Clasificación
PZ-DM-001	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-DM-002	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-DM-003	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-DM-005	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-DM-006	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-DM-007	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-NM-001	Cálcicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-NM-005	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-006	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-007	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-008	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-011	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-012	Sódicas	Sin anión dominante	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-013	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-014	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-015	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-016	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-019	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-002	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-021	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-NM-022	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-NM-023	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-025	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-026	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica

Punto	Catión dominante	Anión dominante	Clasificación
PZ-NM-027	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-NM-028	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-029	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-003	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-030	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-031	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-NM-032	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-NM-009	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-024	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-047	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-048	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-049	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-NM-050	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-051	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-052	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-053	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-054	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-055	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-056	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-057	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-058	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-059	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-060	Sin catión dominante	Sin anión dominante	Sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas
PZ-NM-061	Sin catión dominante	Bicarbonatadas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ-NM-062	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-020	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-033	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-034	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-036	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-037	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica
PZ-NM-038	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-039	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-040	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-042	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-044	Sódicas	Cloruradas	Clorurada y/o sulfatada sódica
PZ-NM-045	Sódicas	Bicarbonatadas	Bicarbonatada sódica

De manera general, los resultados de laboratorio y el análisis hidrogeoquímico permiten observar una clara diferencia entre las aguas subterráneas de Leticia y Tabatinga. Esta diferencia se evidencia en el incremento en los valores de conductividad, sólidos disueltos, nitratos, cloruros y en el mayor grado de mineralización de los pozos de Tabatinga respecto a los de Leticia, acompañado con una leve disminución del pH en Tabatinga, lo que se puede asociar a los diversos factores hidrogeológicos y antrópicos que se presentan en esta zona.

Como se mencionó anteriormente, la tendencia general de la dirección de flujo subterráneo es de noroeste a sureste, lo que permite que las aguas de Tabatinga al tener un recorrido mayor presenten concentración de cloruros más alta y sean ligeramente más mineralizadas que las de Leticia. Esto ocurre debido a que, en condiciones normales, el agua subterránea se enriquece inicialmente en bicarbonatos y calcio y a medida que el flujo avanza la composición del agua subterránea cambia, transformándose gradualmente hasta enriquecerse en cloruros y sodio, este último producto de intercambio catiónico y alteración de minerales de las arcillas.

Además, la baja conductividad eléctrica y la baja mineralización en las aguas subterráneas, en conjunto con valores de oxígeno disuelto alto, están indicando que en toda la región del acuífero transfronterizo las aguas se caracterizan por una interacción constante con agua lluvia y superficial, como el río Amazonas; sin embargo; es posible que esta interacción se presente de manera diferencial, siendo más notable la influencia de los drenajes superficiales y aguas lluvias en la región de Leticia, donde estos parámetros son relativamente más bajos en comparación con los registrados en Tabatinga.

Adicionalmente, las muestras en Leticia se caracterizan por que el bicarbonato es el ion dominante mientras que en Tabatinga el ion dominante es el sodio (Figura 123), lo que podría estar indicando que en Leticia predominan los procesos químicos que se desarrollan en la zona vadosa y donde se produce una mayor interacción con fuentes de agua superficiales; por otro lado, en Tabatinga, las aguas con una composición más sódicas pueden estar reflejando el intercambio catiónico o bien la alteración de silicatos que se produce por la disolución de minerales de las arcillas.

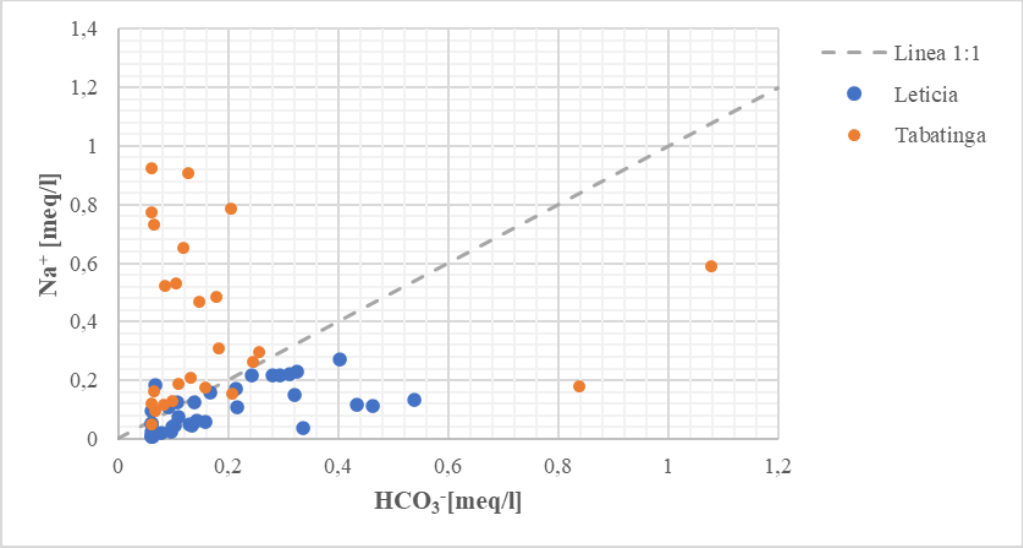


Figura 123. *Relación HCO_3^- – Na^+ para los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

A su vez, es posible que esta variación entre las aguas subterráneas sea notable por la profundidad a la que se realizan las captaciones en los pozos, donde los más superficiales pueden estar captando aguas más jóvenes y menos mineralizadas mientras que en las captaciones más profundas es factible que se tomen aguas con tiempos de residencia mayores, y por tanto más mineralizadas.

Además, se pueden presentar casos de contaminación antrópica en lugares puntuales que aumenten localmente las concentraciones de cloruros y nitratos en las muestras analizadas; esta contaminación es factible que provenga principalmente de pozos sépticos, vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales e incluso de fuentes hídricas contaminadas. A su vez, el uso de pastillas de cloro al interior de algunos de los pozos monitoreados como método de tratamiento para la potabilización del agua, puede estar contribuyendo al aumento de la concentración de este parámetro.

10. RED DE MONITOREO DE CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

10.1. Importancia de la red de monitoreo

El monitoreo es un procedimiento que brinda información para decisiones relacionadas con el uso y manejo de aguas subterráneas y la identificación de nuevas fuentes de abastecimiento de aguas subterráneas, la evaluación de sitios para la implementación de rellenos sanitarios y la estimación de los efectos de las actividades antrópicas sobre los acuíferos.

Para que un programa de monitoreo sea efectivo, debe ser flexible y considerar las condiciones hidrogeológicas regionales y locales, el uso y ocupación de la tierra, las demandas de agua actuales y futuras y las necesidades específicas de los diferentes usuarios.

Diseñar un programa de monitoreo implica decidir qué monitorear, dónde y cuándo, dependiendo del propósito del monitoreo (EUROPEAN COMMISSION, 2004)

Según Martínez (2004), el monitoreo debe ser considerado como un procedimiento sistémico que involucra la ejecución de varias actividades que pueden ser:

- Delimitación del área de monitoreo.
- Análisis de la estructura geológica, sistema de flujo subterráneo y calidad del agua subterránea.
- Diseño de la red de monitoreo.
- Definición e implementación de métodos de recolección e investigación de campo y procedimientos analíticos de laboratorio.
- Determinar la frecuencia de muestreo y selección de variables a analizar y adoptar procesos que aseguren la calidad de los datos obtenidos.
- Análisis, procesamiento e interpretación de datos.

Martínez (2004) establece que un programa de seguimiento involucra no sólo el sistema de seguimiento, sino también un sistema de información y un sistema de gestión. El sistema de gestión, que representa la fase final del programa, efectivamente se refiere al uso de los resultados como apoyo para la implementación de políticas y estrategias para la protección de los recursos hídricos subterráneos.

Complementando la comprensión de este autor, Uil et al. (1999) apud Días et al. (2008) define que el seguimiento es un proceso cíclico en la medida en que la mejora de la caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica conduce a la revisión y adaptación de la red.

Para que el seguimiento contribuya decisivamente a la gestión de los recursos hídricos subterráneos, es necesario añadir información meteorológica e hidrológica a los resultados obtenidos de la interpretación de los datos. Este procedimiento considera el análisis conjunto de los componentes del ciclo hidrológico y reconoce el papel de las aguas subterráneas en el

mantenimiento del flujo, la calidad y la ecología de las aguas superficiales y viceversa. Se resalta que esto es una recomendación, sin embargo, se debe validar si para cada país se cuentan con estaciones que cumplan con la calidad o longitud e datos necesarios para esto, o bien si es pertinente evaluar y analizar la posibilidad de crear una red meteorológica para la zona.

10.2. Diseño y construcción de la red de monitoreo

La red de monitoreo de la calidad y cantidad del agua subterránea tiene como objetivo principal determinar las tendencias generales a corto y largo plazo de la fluctuación en el nivel del agua subterránea en la zona de estudio, así como evaluar las concentraciones de determinados contaminantes para determinar la calidad del agua y, de esta forma, poder establecer medidas de manejo que propendan por la protección del acuífero y reduzcan los impactos potenciales en la salud humana.

Para definir la ubicación y la cantidad de los sitios de monitoreo, se toma como base la ubicación y resultados del monitoreo preliminar de cantidad y calidad del agua subterránea, así como los criterios considerados en el caso de la red de monitoreo preliminar (capítulo 9.3). Adicionalmente, se tiene en cuenta que:

- Los pozos seleccionados del monitoreo preliminar, en la medida de lo posible, deben contar con la infraestructura adecuada que permita la medición de niveles de agua subterránea, así como adecuadas condiciones sanitarias (tales como sello sanitario, tapa de seguridad, piso de cemento, cerca alrededor de la captación). Sin embargo, de los 22 puntos seleccionados de la red de monitoreo preliminar solamente 3 de los puntos (PZ-NM-23, PZ-NM-28 y PZ-NM-32), no cuentan con la infraestructura adecuada, pero se considera importante incluir estos puntos en la red para tener alertas tempranas de contaminación en el acuífero por encima de los estándares de la norma y poder implementar acciones en estos puntos a tiempo.
- Adicionalmente, deben ser puntos que sean accesibles a lo largo del tiempo y que permitan la trazabilidad de la calidad del agua subterránea; por lo tanto, no se tiene en cuenta puntos de uso industrial a los cuales no es posible el acceso o este es muy limitado.
- Se seleccionan los puntos que durante el monitoreo preliminar evidenciaron concentraciones anómalas en algún parámetro respecto a las condiciones generales de la zona o parámetros que no cumplen con la normativa para su uso, de acuerdo con el decreto 1076 de 2015 (Republica de Colombia, 2015) y la resolución 2115 de 2007 para Colombia (MPS & MAVDT, 2007), y la resolución CONAMA n° 396, del 3 de abril de 2008 (CONAMA, 2008) y la *Portaria* GM/MS n° 888/2021 para Brasil (Ministério da Saúde, 2021).
- Se incluyen los pozos 1300004144, 1300004150, 1300004156 y 1300004165 del inventario suministrado por la ANA en el 2022, con el objetivo de aumentar la cobertura espacial de la red de monitoreo, especialmente al sur del área de estudio.

- Adicionalmente, se propone la construcción de 6 piezómetros nuevos dedicados únicamente al monitoreo del agua subterránea, los cuales deben ser construido de acuerdo con la norma NTC3948 de Colombia, y las ABNT NBR 15495-1 y NBR 15495-2 para Brasil.

En total, la red de monitoreo propuesta para su implementación en el corto o mediano plazo está integrada por 32 puntos, entre los que se encuentran 4 del inventario de la ANA, 6 piezómetros propuestos y 22 pozos del monitoreo preliminar; de estos último 3 están destinados para consumo humano (PZ-NM-002, PZ-NM-031, PZ-NM-032) y los pozos restantes son empleados principalmente para consumo humano y doméstico colectivo. En la Figura 124 y Tabla 70 se presenta la ubicación de los puntos que conforman la red de monitoreo.

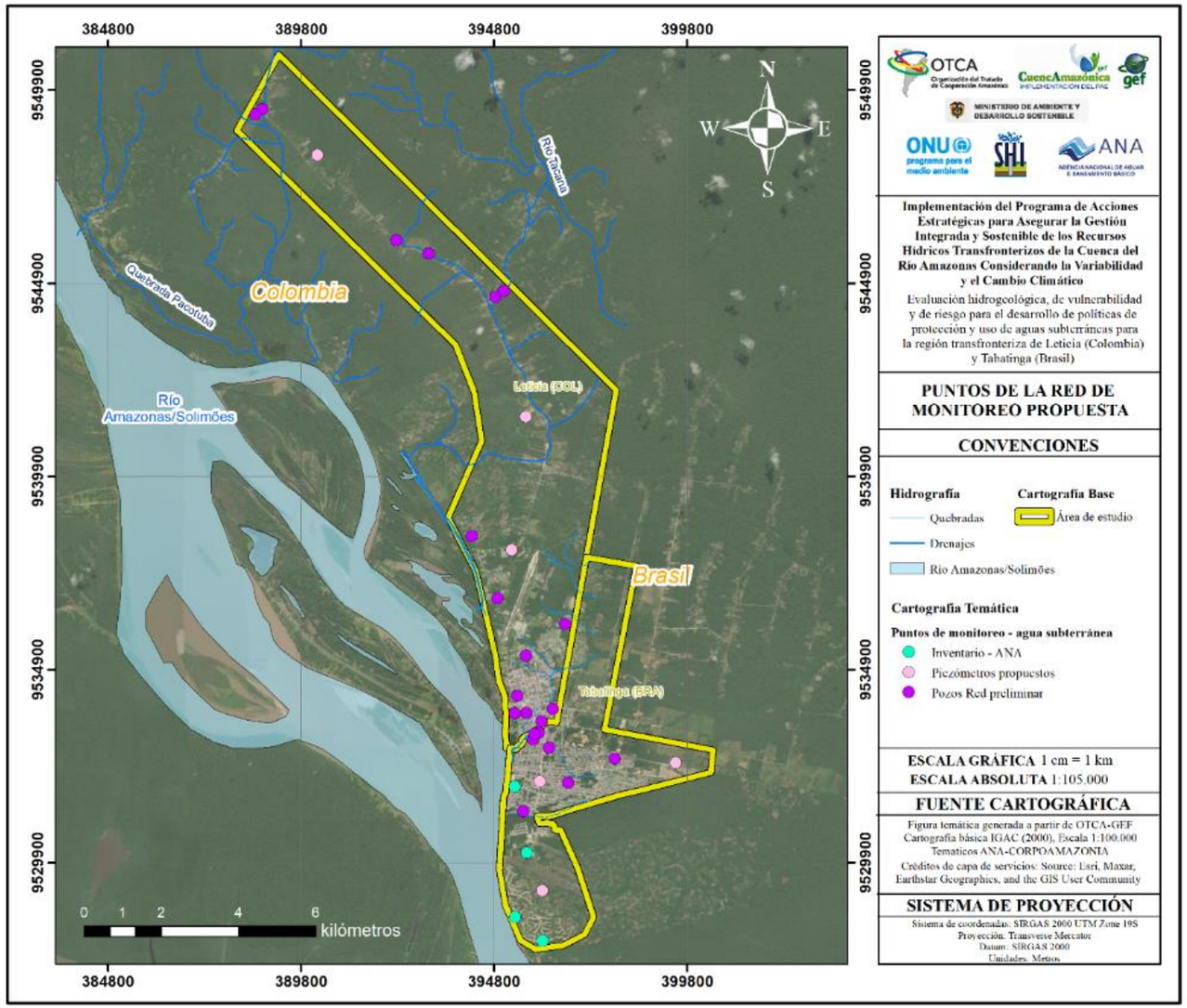


Figura 124. *Distribución espacial de los puntos propuesto de la red de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

Tabla 70. *Localización de los puntos propuestos de la red de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Código	Tipo punto	Coordenadas – UTM Zone 19S		Municipio	Localización
		Este	Norte		
PZ-NM-002	Red preliminar	394.223,62	9.538.341,98	Leticia	Finca San Sebastián
PZ-DM-007	Red preliminar	396.643,61	9.536.065,55	Leticia	Colegio Francisco Rosario Vela sede B
PZ-NM-009	Red preliminar	396.030,08	9.533.548,01	Leticia	Estación de servicio El Porvenir
PZ-NM-011	Red preliminar	395.341,27	9.533.758,46	Leticia	Estación experimental de primates – FIDIC
PZ-NM-012	Red preliminar	395.397,52	9.534.212,52	Leticia	Banco de la Republica – Colombia
PZ-NM-014	Red preliminar	395.640,24	9.533.767,01	Leticia	Numae
PZ-NM-015	Red preliminar	394.892,01	9.536.734,00	Leticia	Centro recreacional Cafamaz
PZ-NM-021	Red preliminar	388.790,93	9.549.402,93	Leticia	Comunidad del km 18
PZ-NM-023	Red preliminar	392.268,57	9.546.012,93	Leticia	Kilómetro 12 vía Leticia-Tarapacá
PZ-NM-026	Red preliminar	396.327,08	9.533.869,37	Leticia	Colegio Gaitán sede sagrado Corazón de Jesús
PZ-NM-028	Red preliminar	395.630,20	9.535.247,85	Leticia	Carrera 7 con calle 16
PZ-NM-030	Red preliminar	393.104,64	9.545.667,00	Leticia	Hebrón ONG
PZ-NM-031	Red preliminar	394.834,10	9.544.542,67	Leticia	Comunidad km 11
PZ-NM-032	Red preliminar	395.056,34	9.544.690,64	Leticia	Comunidad km 12
PZ-NM-033	Red preliminar	395.820,96	9.533.076,92	Tabatinga	Rua Ana Nery, 84. Bairro São Francisco
PZ-NM-038	Red preliminar	395.565,04	9.531.225,06	Tabatinga	Beco rua 13 de maio, casa 68
PZ-NM-039	Red preliminar	395.848,68	9.533.212,97	Tabatinga	Rua Marechal Rondon, 2.371
PZ-NM-047	Red preliminar	388.620,47	9.549.265,34	Leticia	Km 8 vía Pichuna
PZ-NM-049	Red preliminar	397.927,01	9.532.582,12	Tabatinga	Rua Castro Alves
PZ-NM-052	Red preliminar	395.965,28	9.533.259,21	Tabatinga	Rua Marechal Rondon, 233
PZ-NM-055	Red preliminar	396.229,90	9.532.870,61	Tabatinga	Rua Rui Barbosa, bairro centro, casa 30
PZ-NM-061	Red preliminar	396.719,22	9.531.963,16	Tabatinga	Rua T-2, casa 76
1300004144	Inventario ANA	396.055,41	9.527.872,58	Tabatinga	Comunidade Umariacu II
1300004150	Inventario ANA	395.345,59	9.528.485,94	Tabatinga	Comunidade Umariacu I
1300004156	Inventario ANA	395.651,88	9.530.144,58	Tabatinga	Estrada do aeroporto
1300004165	Inventario ANA	395.341,47	9.531.863,83	Tabatinga	Portobrás
PZ-001	Piezómetro	390.222,24	9.548.217,02	Leticia	
PZ-002	Piezómetro	395.619,75	9.541.443,67	Leticia	
PZ-003	Piezómetro	395.259,91	9.537.993,50	Leticia	
PZ-004	Piezómetro	399.514,42	9.532.480,10	Tabatinga	
PZ-005	Piezómetro	396.052,53	9.529.169,63	Tabatinga	
PZ-006	Piezómetro	395.993,00	9.531.991,42	Tabatinga	

10.3. Validación geoestadística de la red de monitoreo preliminar

Para la selección de los puntos que conforman la red monitoreo se priorizó el criterio hidrogeológico, donde el número y localización de los pozos de monitoreo fue determinado según las condiciones hidrogeológicas de la zona y considerando la ubicación de las fuentes potenciales de contaminación y aquellas regiones con mayor peligro de contaminación del agua subterránea; sin embargo, con el objetivo de complementar y verificar su representatividad espacial se hace un análisis geoestadístico de la red por medio del software ArcGIS en su versión 10.5. Similar a lo realizado en el caso de la validación de la red de monitoreo preliminar, se hace el cálculo de variables estadísticas significativas que permitan explicar el comportamiento espacial de los puntos, las cuales tienen en cuenta la correlación espacial entre cada uno de los puntos con base en la distancia entre ellos determinando su peso en la distribución, con respecto al área del proyecto.

Los estadísticos de análisis que se consideran son la media geométrica ($\bar{X}$), la desviación estándar (σ), la distancia estándar (SD) y el índice del vecino más próximo (Average Nearest Neighbor - ANN).

Según los resultados de la media geométrica, la desviación y la distancia estándar (Figura 125), la mayor significancia estadística se presenta cerca del centro/sur del área de estudio, debido a en que en esta zona se ubican la mayoría de los pozos que conformaban la red de monitoreo preliminar y en donde se enfocan los esfuerzos del monitoreo, dado que corresponde a la región con mayor densidad poblacional.

Además, igual a lo observado en la red de monitoreo preliminar, la desviación estándar está alargada en la dirección noroeste-sureste, siguiendo la tendencia general del área de estudio; de esta forma se puede observar que los puntos de monitoreo definidos tienen una mayor cobertura espacial de las áreas urbanas y, por tanto, representan de forma estadísticamente significativa las condiciones de estas zonas, mientras que las regiones menos pobladas se presentan una menor cobertura, y por tal razón, una menor significancia estadística .

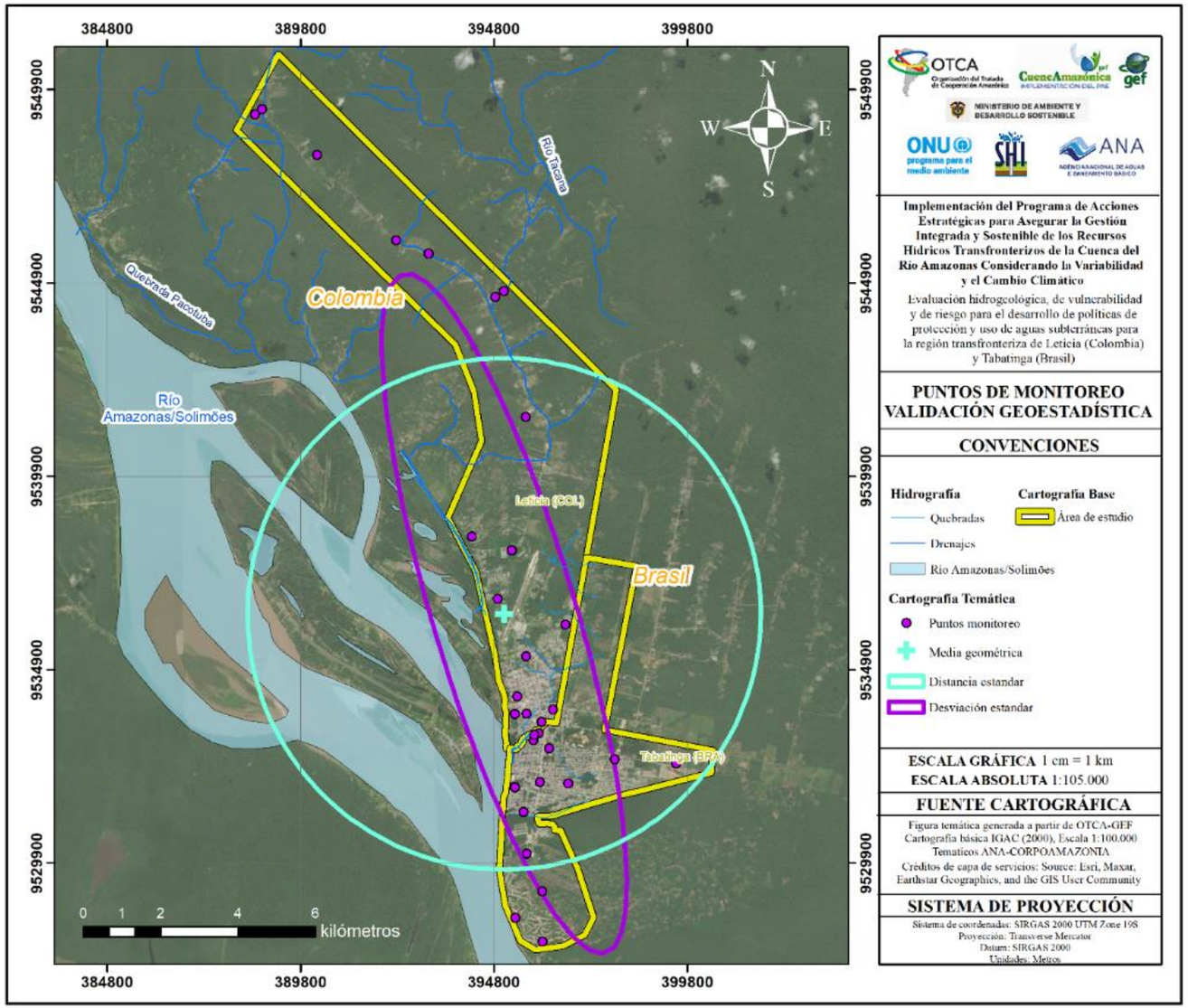


Figura 125. *Validación geoestadística de los puntos de monitoreo. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023). Mapa base: Maxar (2018-2022).*

Según los resultados obtenido en el análisis del vecino más próximo (ANN), la localización de los puntos de monitoreo seleccionados está agrupada (Z=-1,96), lo que significa que estos no presentan un patrón establecido, pero donde los parámetros de agua subterránea para un pozo específico con valores desconocidos pueden ser estimados y predichos en función de los pozos más cercanos con valores conocidos, Figura 126.

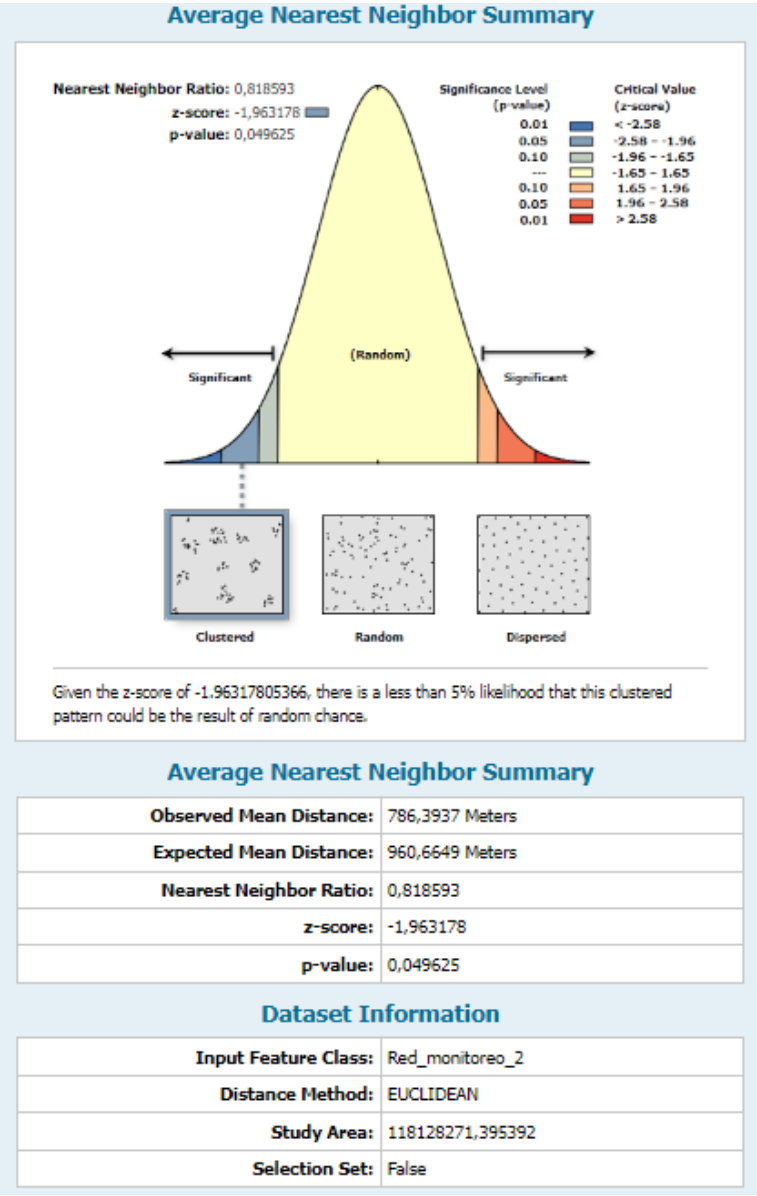


Figura 126. *Resultado del índice de vecino más próximo para la red de monitoreo utilizando el software ArcGIS. Fuente: OTCA & SHI SAS, (2023).*

10.4. Estrategias para la operación y mantenimiento de la red de monitoreo

La operación de un programa de monitoreo de aguas subterráneas es una de las herramientas más importantes para obtener la información necesaria para la adecuada toma de decisiones sobre el desarrollo sostenible y ambientalmente racional, así como la protección de los recursos de aguas subterráneas. En este caso, donde se tiene un acuífero transfronterizo, es necesario que tanto los objetivos del monitoreo como los procedimientos de muestreo y análisis químicos sean similares o comparables en ambos lados de la frontera.

Además; el proceso de monitoreo debe entenderse principalmente como una secuencia de actividades relacionadas entre sí, las cuales parten de la definición de las necesidades de información y termina con el reporte y uso de la información recolectada, (Figura 127).

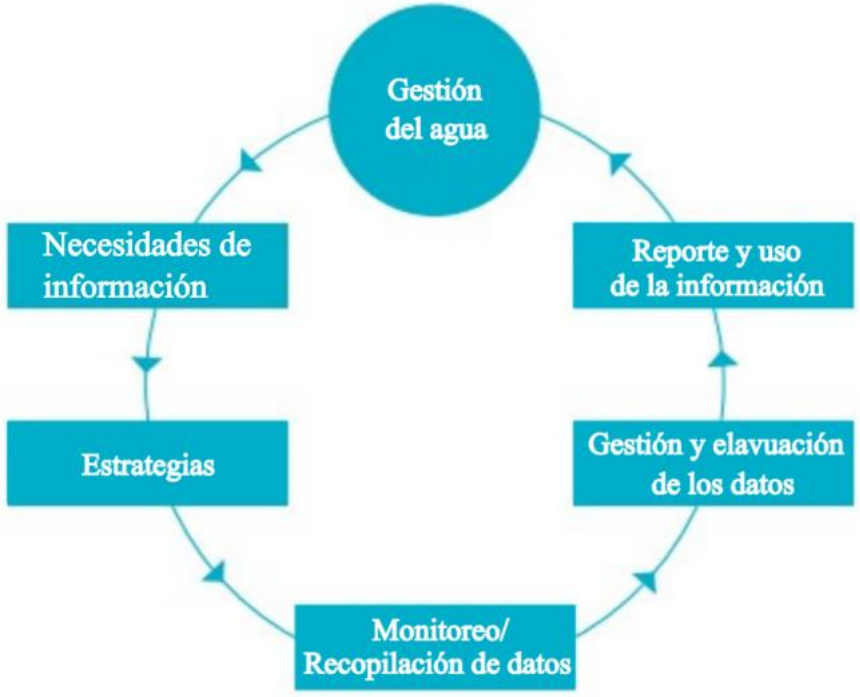


Figura 127. *Ciclo de monitoreo de agua subterránea. Fuente: UNECE (2006).*

Es importante resaltar que, con la implementación de la red de monitoreo de agua subterránea se puede contribuir a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU. La red de monitoreo puede ayudar a garantizar el acceso al agua limpia y saneamiento adecuado, que es el objetivo principal del ODS 6; al monitorear la calidad del agua subterránea se pueden identificar problemas de contaminación lo que permite establecer medidas preventivas para proteger la calidad del agua y tomar decisiones informadas para su gestión sostenible. Además, el acceso al agua potable es esencial para el desarrollo sostenible urbano (ODS 11), y la implementación de una red de monitoreo permite planificar y gestionar el suministro adecuado del

agua a la población, así como a sectores claves, sin comprometer los recursos hídricos a largo plazo. Finalmente, para el funcionamiento adecuado de la red se deben establecer alianzas entre las diversas partes interesadas y entidades de cooperación (ODS17), como agencias gubernamentales, instituciones académicas y comunidades locales, de forma que se facilite la divulgación de los conocimientos y se compartan los recursos y experiencia en la gestión sostenible del agua, lo que contribuye a mejorar la cooperación local e internacional para lograr los objetivos de desarrollo sostenible.

Como se mencionó anteriormente, adicional a los 26 pozos que fueron seleccionados de la red de monitoreo preliminar y de la base de datos de la ANA, se propone la instalación de 6 piezómetros distribuidos a lo largo de la zona de estudio para el monitoreo del agua subterránea. Durante la fase de construcción de los piezómetros es importante que se haga una descripción detallada de las litologías encontradas durante la perforación, de forma que permita la caracterización de las condiciones geológicas del acuífero; además, es importante realizar pruebas de bombeo que posibiliten la obtención de parámetros hidráulicos del acuífero como conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, para lo cual es necesario que los piezómetros cuenten con el diámetro adecuado para tal fin. En general se recomienda que la instalación de los piezómetros se realice siguiendo las pautas presentes en la NTC 3948 de Colombia y las ABNT NBR 15495-1 y NBR 15495-2 de Brasil, en la cual se establecen las especificaciones técnicas que se deben cumplir en la construcción de pozos de monitoreo para la evaluación de la calidad de las aguas subterráneas. Adicionalmente, se recomienda una inspección anual de los piezómetros, para su limpieza y mantenimiento.

10.4.1. Monitoreo de cantidad (niveles)

Inicialmente, para el monitoreo de niveles de agua subterránea, se proponen 2 escenarios, donde la implementación de uno u otro dependerá de los recursos económicos y de personal disponible para esta labor.

En el primer escenario, el monitoreo de los niveles de agua subterránea se realiza de forma manual, por un técnico mediante una sonda de nivel. Es importante que durante el primer año de monitoreo las mediciones se realicen una vez al mes, esto con el objetivo de generar una serie de datos que sirva de base para analizar las fluctuaciones futuras que puedan ocurrir en el nivel del agua subterránea. A partir del segundo año, y considerando los resultados obtenidos, se podría considerar modificar la frecuencia del monitoreo. Adicionalmente, las mediciones de nivel pueden estar acompañadas de toma de parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto.

En vista de que muchas veces las personas de la zona son reacias a facilitar información del pozo o a permitir el ingreso para realizar los trabajos de monitoreo, es fundamental realizar una capacitación y socialización previa con la comunidad en la que se explique las características principales del agua subterránea y la importancia de llevar a cabo estudios sobre este recurso, así como el proceso de selección de los puntos de monitoreo y las ventajes que conlleva la implementación de una red de monitoreo de calidad y cantidad del agua subterránea. De esta forma, y buscando que los residentes sean actores activos en la gestión de este recurso, el monitoreo de

cantidad de agua subterránea podría estar acompañado de una red de monitoreo comunitaria, en la cual los habitantes de la zona sean los encargados de realizar las mediciones de nivel cada semana y reportar los datos a la autoridad competente.

Entre las consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de realizar esta actividad se encuentran: establecer con precisión la elevación de todos los puntos que conforman la red de monitoreo con un GPS de alta precisión (esto para los 11 puntos que no cuentan con nivelación de precisión), de forma que esta información sirva de base para todas las medidas futuras, considerar la superficie del terreno como el punto de referencia para las medidas y verificar que no haya objetos extraños dentro de los pozos que puedan modificar el nivel del agua, así como solicitar y verificar con los propietarios o personas a cargo de las captaciones que el pozo no sea bombeado en las en las horas previas a la toma de nivel, idealmente 12 horas.

En el segundo escenario, que es el más recomendado, cada pozo de la red de monitoreo debe estar equipado con un levelogger para la toma automática de los niveles de agua subterránea. En este caso, se pueden obtener datos con una mayor frecuencia respecto al primer escenario, dado que es posible obtener datos horarios. No obstante, en este tipo de instrumentación la información puede ser enviada remotamente por telemetría o se hace descarga manual de los datos almacenados. Idealmente la recolección manual de la información debe ser cada 3 meses, momento en el que también se debe llevar a cabo la calibración y limpieza de los sensores de monitoreo, así como la comprobación del estado de los dispositivos. De ser posible, es recomendable la instalación de sondas de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, en cuyo caso el mantenimiento de los equipos debe realizarse cada 2 meses.

De manera adicional, para el caso en que se usen levelogger también es necesario la instalación de una estación que registre la presión atmosférica en la zona de estudio, la cual debe tener la misma resolución temporal establecida en los sensores de los piezómetros de monitoreo; esta estación tiene como objetivo corregir los datos de nivel del agua subterránea, que son calculados a partir de la presión de la columna de agua, respecto a las variaciones de la presión atmosférica.

10.4.2. Monitoreo de calidad

En la red de monitoreo propuesta también se contempla un monitoreo periódico de la calidad del agua subterránea, este se debe realizar 2 veces al año, en los periodos húmedo (enero-marzo) y seco (julio-septiembre), esto debido a que la calidad del agua subterránea, en especial en acuíferos libres, está íntimamente relacionada con las variaciones temporales de variables meteorológicas e hidrológicas, lo que implica la posibilidad de tener variaciones estacionales en los parámetros de calidad; los parámetros mínimos recomendados para el monitoreo de la calidad del agua son: temperatura, turbidez, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, alcalinidad total, dureza, cationes principales (Na^+, K^+, Ca_2^+, Mg_2^+), aniones principales (Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^-) componentes químicos secundarios (Fe, Mn y Al), componentes de la serie nitrogenada (NO_2^- y NO_3^-), demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno (DQO, DBO_5) y los análisis microbiológicos de coliformes termotolerantes, totales y Escherichia Coli. Es necesario resaltar que los parámetros microbiológicos son muy importantes al momento de determinar la calidad del agua, especialmente si esta es para consumo humano; sin embargo, debido

a que la zona de interés se encuentra en una región remota, donde el transporte presenta bajas frecuencias e intermitencia, es posible que estas muestras lleguen vencidas al laboratorio, para lo cual se requiere de una planificación de campo muy precisa y rigurosa y contar con un laboratorio acreditado en alguna de las 2 ciudades.

El muestreo de la calidad de las aguas subterráneas incluye las mediciones de campo, la purga de pozos, el muestreo, la conservación y el transporte de muestras, actividades mucho más complejas que el monitoreo de niveles de agua subterránea y, por lo tanto, requiere técnicos acreditados por los protocolos del IDEAM (2002; 2021) en Colombia y del INMETRO en Brasil. Además, el análisis de los parámetros de calidad debe ser llevado a cabo por un laboratorio también acreditado por el IDEAM (Colombia) o por INMETRO (Brasil), para garantizar la representatividad de la muestra. Aunque en la zona de Tabatinga se presentan áreas agrícolas hacia la zona rural al norte, dichas zonas no están dentro del área de estudio definida en los TdR; por lo tanto, los parámetros sugeridos dentro de la red no se incluyen adicionales para identificar contaminación por pesticidas y fertilizantes agrícolas.

Se debe procurar que los datos de nivel y calidad tomados en esta red sean de conocimiento público para que los usuarios de pozos dentro de la red puedan usar esta información para identificar fallas y problemas sanitarios en sus captaciones y que así puedan ser proactivos en su solución.

Recomendaciones adicionales Debido a la enorme cantidad de datos que pueden llegar a ser generados durante el monitoreo de aguas subterráneas, esta información debe ser recopilada en bases de datos fáciles de usar y que deben constituir la base para el almacenamiento y procesamiento adecuado de los datos; para esto, las bases de datos pueden ser diseñada en SQL, preferiblemente en PostgreSQLo en cualquier otro lenguaje de programación para que la información sea más fácilmente accesada y compartida. Se recomienda, además, la aplicación de programas informáticos SIG para facilitar el procesamiento, análisis y representación de los datos.

Adicionalmente, se debe guardar una cantidad suficiente de datos adicionales ("metadatos"), que es necesaria para la correcta interpretación de la información de los monitoreos, como, por ejemplo, características con respecto al lugar y fecha, profundidad del muestreo, el tipo de punto, condiciones climáticas, nombre del laboratorio y persona que muestrea, técnicas analíticas, límite de detección, entre otros.

Por su parte, la validación de datos debe ser una parte intrínseca del manejo de datos. El control regular de los datos recién producidos debe incluir la detección de valores atípicos, valores faltantes, errores de escritura y otros errores, para posteriormente ser incluidos en la base de datos.

En el caso de las series temporales de niveles de agua subterránea con valores extremos poco realistas, estas se pueden controlar visualmente mediante el trazado de hidrogramas, aplicando pruebas estadísticas (como intervalos de confianza) o realizando correlaciones con pozos vecinos.

Para el caso de la información obtenida del monitoreo de calidad, la validación de los datos debe incluir el cálculo del balance iónico, la detección de valores extremos y de relaciones químicas anómalas; asimismo, estos datos deben ser contrastados con información del propietario del pozo.

Además, se deben hacer otros controles asociados a la correcta identificación de los puntos, el sistema de coordenadas y la concordancia de las coordenadas con la zona de estudio, las unidades de los parámetros medidos, que no haya valores por debajo del límite de detección.

Para mantener la integridad de los datos recolectados, solo una persona debe ser la encargada de actualizar y de editar la base de datos o, en caso de que se requieran varias personas, se deben establecer protocolos estrictos para su manejo. A su vez, se debe hacer una copia de seguridad periódicamente, tanto de los datos brutos como de la base de datos verificada, para su posterior almacenamiento en un servidor.

Esta información debe ser reportada no solo a nivel del propio organismo encargado del monitoreo, sino también ser compartida a la comunidad y a quienes necesiten emplearla para la toma de decisiones, validación de modelos, evaluación de la gestión o investigaciones.

En este sentido, se destaca la existencia del Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS) del Servicio Geológico de Brasil (SGB/CPRM), que es una base de datos de pozos permanentemente actualizada, y módulos capaces de realizar consultas, investigaciones y extracciones y reportes. Además de los datos de los puntos de agua, SIAGAS almacena datos de la Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas - RIMAS, tanto datos de construcción como parámetros hidrogeológicos así como datos de calidad de las aguas subterráneas. Los datos están disponibles en el Portal SIAGASWeb a través de encuestas, informes, descargas y mapas interactivos. La SGB ha firmado acuerdos con los países de América del Sur que permiten el uso y entrenamiento en este sistema.

Dado que en muchos casos el monitoreo de las aguas subterráneas por sí solo no puede proporcionar toda la información necesaria para una gestión adecuada de estos recursos hídricos, se recomienda integrar este monitoreo con el monitoreo del agua superficial. A su vez, esto se puede complementar con la instalación de una estación meteorológica en la zona o con el análisis de datos meteorológico si se cuenta con la cantidad y calidad suficiente en estaciones cercanas a la zona. De esta manera podrían ampliarse los análisis de interacción río-acuífero, que ya se han hecho en la zona teóricamente, se podría mejorar la estimación de la recarga potencial por precipitación y se podrían hacer correlaciones entre las variaciones de los niveles de agua y los parámetros hidroquímicos en función de los cambios en precipitación.

Finalmente, la modelación numérica es una actividad complementaria al monitoreo, que puede contribuir considerablemente a la comprensión del flujo de agua subterránea y a los cambios en la calidad del agua subterránea en el área considerada. De esta forma, se pueden implementar distintos modelos numéricos de contaminantes, así como también modelos de flujo para determinar el comportamiento de los niveles de agua subterránea y obtener caudales de extracción del agua subterránea a lo largo del tiempo, así como determinar perímetros de protección para los pozos

cercanos a las principales fuentes de contaminación y conocer el comportamiento de los contaminantes en el medio subterráneo.

10.4.3. Estrategias administrativas de operación y mantenimiento

Teniendo en cuenta lo anterior, las entidades ambientales/de recursos hídricos de cada país deben ser las encargadas de **supervisar la prospección, exploración y concesión de los puntos de la red que lo requieran,** dentro de su jurisdicción. Estas autoridades harán la toma de datos y el procesamiento de la información, pero en el mantenimiento de pozos debe estar a cargo de la entidad o persona a quien corresponda esta función. Los equipos de medición de niveles instalados en cada pozo deben ser adquiridos por en financiador de la red para entregar a la corporación. Adicionalmente, deben buscar articular y optimizar las redes de monitoreo locales mediante su integración a redes de monitoreo regionales o a otros programas relacionados con el recurso hídrico.

El financiador de la red de monitoreo debe garantizar los recursos económicos a corto y mediano plazo y debe encargarse de contratar a una empresa consultora o a una universidad de la región, quienes serían los responsables de **operar la red**. Estas entidades deberán ser las encargadas de supervisar la construcción de los piezómetros y deben contar con personal capacitado para la puesta en marcha de la red, incluyendo la instalación de los equipos de medición, la calibración y los manteamientos periódicos y, a su vez, serán las responsables de instruir y capacitar al personal designado por las entidades ambientales, en la toma de parámetros fisicoquímicos en campo y niveles de agua en el caso de se implemente el primer escenario, en el cual el monitoreo de cantidad de agua subterránea se realizará de forma manual y esté acompañado por una red de monitoreo comunitaria.

Por otra parte, el operador será el responsable de llevar a cabo el muestreo de calidad durante las dos épocas climáticas del año y la entidad designada para tal fin debe estar acreditada para la toma de muestras; sin embargo, estas actividades de monitoreo pueden ser apoyado por personal de las corporaciones ambientales. Adicionalmente, los operadores de la red deben ser quienes analicen de forma preliminar los datos recopilados para identificar errores, desviaciones y problemas de calibración de los equipos para, posteriormente, poder compartir los datos preprocesados al supervisor de la operación (corporaciones regionales/ambientales).

Dado que la red de monitoreo de agua subterránea involucra tanto a Colombia como a Brasil, se deben establecer objetivos comunes en términos de calidad del agua y establecer un marco legal conjunto, emplear formatos estandarizados para el reporte de la información, así como realizar las campañas de monitoreo de manera conjunta, o mínimamente verificar que estas se lleven a cabo en las mismas fechas. Por lo tanto, se debe crear una mesa de trabajo conjunta con profesionales de cada entidad ambiental que vaya a estar involucrada en la supervisión de la red, para que coordine las actividades a realizar durante las campañas de monitoreo, recopile, almacene, analice la información binacional, y la comparta de manera oportuna a las entidades tomadoras de decisiones y público interesado.

A través de las alcaldías o juntas de acción comunal se pueden hacer convocatorias para contratar personal de la zona que estará encargado de realizar el monitoreo de parámetros fisicoquímicos en campo, si la red es manual, o que apoye la instalación de los piezómetros y el mantenimiento de los equipos. Esto permite involucrar a la comunidad en diversas actividades que se requieren para la implementación adecuada de la red de monitoreo, lo que su vez, sirve para proteger la infraestructura asociada a cada punto de monitoreo.

Además, desde las juntas de acción comunal o desde las mismas entidades ambientales se deben crear lugares de socialización con la comunidad antes de iniciar las campañas de monitoreo. Lo que se pretende con estos espacios es involucrar a los habitantes de la zona en los monitoreos para aumentar la conciencia y sensibilización sobre la importancia del agua subterránea y promover una responsabilidad compartida en la preservación y uso responsable del recurso.

Finalmente, se debe concientizar a la comunidad sobre la importancia de realizar las campañas de monitoreo, los beneficios que conlleva realizar un mantenimiento periódico a las instalaciones y lo esencial que es mantener en buen estado y proteger los equipos de medición. En estos espacios, a su vez, se deben establecer canales de comunicación eficientes para facilitar el acceso a los pozos en los que se realizarán las mediciones, la divulgación de la información recopilada y la implementación de medidas preventivas o correctivas de ser necesario.

10.4.4. Análisis de costos

Como se mencionó en los ítems anteriores, la puesta en marcha de la red se propone llevar a cabo en dos escenarios, la escogencia de uno u otro va a depender del presupuesto disponible para esta red y de la facilidad para la toma de información periódica en campo. En la Tabla 71 y la Tabla 72 se presentan los costos aproximados de ambos escenarios. Cabe mencionar que los valores unitarios se hicieron con referencia a los gastos logísticos de las salidas de campo del año pasado de este estudio.

Para el escenario 1 (Tabla 71) se consideran los gastos logísticos de la toma de niveles con personal técnico en Leticia y Tabatinga para dos años, no se consideran gastos de viajes desde otras ciudades al interior de Colombia y Brasil. El ítem 1 de la tabla 71 corresponde al costo operativo (salario) de 2 personas durante 8 días al mes para un total 1 año, los ítems 2 y 3 corresponden al alquiler de los dos equipos necesarios para las mediciones, el ítem 4 corresponde a los gastos de viáticos (alimentación/hidratación) de las 2 personas durante 8 días al mes, para 1 año. En esta medida solo se tendrá un dato mensual de nivel de agua y parámetros fisicoquímicos para un total de 12 datos de nivel de agua en un año. En este escenario se debe contar siempre con personal técnico capacitado en la zona que pueda hacer las mediciones una vez al mes. El valor para dos años de escenario 1 es de USD $55,020.

Tabla 71. *Costos aproximados del escenario 1 en USD-muestreo manual. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

ITEM	DESCRIPCION	VALOR UNITARIO	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Medición mensual de niveles y parámetros de campo					
1	Personal operativo de Leticia y Tabatinga (2 personas, 8 días, 12 meses)	37.5	Días	192	$ 7,200.00
2	Sonda de nivel	6.25	Días	192	$ 1,200.00
3	Multiparamétrico**	25	Días	192	$ 4,800.00
4	Viáticos (2 personas, 8 días, 12 meses)***	17.5	Días	192	$ 3,360.00
5	Vehículo (12meses, 8 días)	87.5	Días	96	$ 8,400.00
Informe mensual consolidado la información de la red manual					
6	Informe mensual consolidado	212.5	Mes	12	$ 2,550.00
TOTAL					$ 27,510.00

*Sólo gastos de personal operativo
** Alquiler de instrumentos y dispositivos de muestreo usados.
***Viáticos y gastos de viaje para 2 personas, 8 días durante 2 año.
****192 días sale de multiplicar 2 personas, 8 días, 12 meses.

Para el escenario 2 (Tabla 72), se consideran los gastos logísticos de la toma de niveles con personal técnico en Leticia y Tabatinga, no se consideran gastos de viaje desde otras ciudades al interior de Colombia y Brasil. En este escenario se hace una única instalación (por parte de 2 personas) de las sondas de nivel de agua, la conductividad eléctrica, temperatura y oxígeno disuelto. Estas sondas se instalan dentro de cada pozo, funcionan con panel solar y la información almacenada está a escala horaria con lo cual se recolectarán 720 datos mensuales de nivel de agua y parámetros fisicoquímicos, para un total de 8640 datos al año. Dicha información es enviada de forma satelital a un celular o correo, automáticamente, por lo cual, el único gasto adicional luego de la puesta en marcha, son mantenimiento preventivos y limpieza de las sondas con una frecuencia trimestral (de acuerdo con el manual de estas sondas), lo cual si implica desplazamiento a cada punto por personal técnico y trabajo de campo.

Es claro que la diferencias en el costo de ambas alternativas es bastante considerable, pero con el escenario 2, que es el más costoso, se garantiza una mayor cantidad de datos que podrán ser útiles para los análisis hidrogeológicos y de interconexión rio-acuífero que se dificultan si se tuviera menos cantidad de datos. Los valores presentados en la siguiente tabla son para la instalación de las sondas y un año de mantenimiento, que según el proveedor de estas sondas debe ser trimestral, Los ítems 1 al 3, corresponden a los gastos logísticos de 2 personas, durante 10 días, para la instalación de las sondas AquaTroll 500 en los 32 puntos, las cuales se compran y se instalan una única vez.

Tabla 72. *Costos aproximados del escenario 2. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Ítem	Descripción	Valor unitario (USD)	Unidad	Cantidad	Valor total (USD)
Puesta en marcha de la red de monitoreo hidrogeológica					
1	Personal operativo de Leticia y Tabatinga (2 personas, 10 días)	$ 37,50	Días	10	$ 375
2	Sonda AquaTroll 500 integrada a un sistema satelital referencia Troll Link	$ 11.249	UN	32	$ 359.983
3	Vehículo (2 Personas, 10 días)	$ 87,50	Días	10	$ 875
Mantenimientos preventivos y/o correctivos de forma mensual y seguimiento semanal de la información					
4	Mantenimientos preventivos y/o correctivos (4 trimestres)	$ 337,50	Trimestre	4	$ 1350
Informe mensual consolidado la información de la red automática					
5	Informe mensual consolidado (12 meses)	$ 212,5	Mes	12	$ 2550
Total					$ 365.118

Para el muestreo hidroquímico, que se propone 2 veces al año en época seca y húmeda, es necesario que el personal que tome las muestras esté acreditado por alguna entidad competente de cada país; por lo tanto, dentro de los costos se consideran tiquetes por fuera de Leticia-Tabatinga. También es necesario que el análisis de laboratorio esté a cargo de un laboratorio acreditado, por lo tanto, se costean envíos de las muestras por fuera de Leticia-Tabatinga.

Tabla 73. *Costeo aproximado de muestreo hidroquímico. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Ítem	Descripción	Valor unitario (USD)	Unidad	Cantidad	Valor total (USD)
Muestreo de calidad					
1	Personal operativo de Leticia y Tabatinga (2 personas, 10 días, 2 campañas)	$ 92,50	UN	40	$ 3.700
2	Muestreo laboratorio en 32 puntos (2 campañas)	$ 375	UN	64	$ 24.000
3	Multiparamétrico	$ 25	UN	40	$ 1.000
4	Viáticos (2 personas, 10 días, 2 campañas)	$ 17,50	UN	40	$ 700
5	Envíos (2 campañas)	$ 45	UN	64	$ 2.880
6	Tiquetes aéreos	$ 250	UN	2	$ 500
7	Vehículo (2 personas, 10 días, 2 campañas)	$ 87,50	UN	40	$ 3.500
Informe mensual consolidando la información de la red manual					
8	Informe semestral consolidado	$ 212,50	Mes	2	$ 425

TOTAL	$ 36.705

Un costo adicional que se debe tener en cuenta es el de los 6 piezómetros que se proponen dentro de la red, se asumen piezómetro de 4" y 50 metros de profundidad como máximos los cuales pueden tener un valor unitario de USD $ 18.750 para un total de USD $ 112.500 para los 6 piezómetros. Adicionalmente se deben de considerar gastos logísticos, alquiler de maquinaria en la zona y de personal de perforación, como se presenta en la Tabla 74.

Tabla 74. *Costeo aproximado de la construcción de piezómetros. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Ítem	Descripción	Valor unitario (USD)	Unidad	Cantidad	Valor total (USD)
Construcción de piezómetros					
1	Piezómetro de 4 " y 50 metros de profundidad	$ 18.750	UN	6	$ 112.500
2	Personal operativo de Leticia y Tabatinga (3 personas. 180 días)	$ 92,5	UN	180	$ 16.650
3	Viáticos (3 personas x 180 días)	$ 17,5	UN	180	$ 3.150
4	Vehículo (3 personas x 180 días	$ 88	UN	180	$ 15.750
TOTAL (USD)					$148.050

11. SEGUNDO TALLER REGIONAL

El 14 de junio de 2023, en el salón de eventos del Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología del Amazonas (IFAM) – Campus Tabatinga, se llevó a cabo el segundo Taller Regional de la intervención "*Evaluación hidrogeológica, de vulnerabilidad y de riesgo para el desarrollo de políticas de protección y uso de aguas subterráneas para la región transfronteriza de Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil)*".

El Segundo Taller contó con la participación de representantes y autoridades de las entidades responsables de la gestión del agua de los niveles Nacionales, Departamentales/Estatales y Municipales de Brasil y Colombia. También se contó con representantes de la IFAM, investigadores, representantes de las fuerzas armadas, representantes de la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica y técnicos de la empresa SHI. La agenda definitiva del evento se presenta en la Tabla 75.

Tabla 75. *Agenda del segundo taller regional. Encuentro presencial en el IFAM – Campus Tabatinga, Brasil. Fuente: OCTA & SHI SAS (2023).*

Hora	Acto	Duración
09:30	Apertura del Taller Regional (ANA/Min. Ambiente/OTCA)	20 min
	Bienvenida por la Alcaldía de Tabatinga y Alcaldía de Leticia	
09:50	Contexto Proyecto Implementación del Programa de Acciones Estratégicas PAE - Cuenca Amazónica (UCR - SP/OTCA)	15 min
10:05	Contexto de la Gestión de aguas subterráneas en el Municipio de Leticia (Min. Ambiente)	15 min
10:20	Contexto de la Gestión de aguas subterráneas en el Municipio de Tabatinga (ANA)	15 min
10:35	Receso (Refrigerio)	15 min
10:50	Presentación de los avances, resultados (SHI)	40 min
11:30	Presentación de una propuesta de Red de Monitoreo transfronterizo de aguas subterráneas	40 min
12:10	Intercambio de ideas con los actores sobre los resultados del estudio en el contexto transfronterizo	45 min
12:55	Intercambio de ideas con los actores, intervenciones, preguntas sobre el Sistema de Monitoreo propuesto (discusión moderada y/ dinámica)	60 min
13:55	Cierre del Evento	15 min
*El evento finaliza con la toma del registro fotográfico final a las 14:15.		

El evento comenzó a las 9:30. La mesa principal fue moderada por el técnico especialista de SP/OTCA Fernando Cisneros. Inició con las palabras de bienvenida del secretario de Medio Ambiente de Tabatinga, Sr. Cleudson Gomes, seguido de presentaciones y discursos del Profesor Marxer Batista y la Rectora suplente de IFAM (sede del evento), Sra. Cindy Nadia.

En representación del Ministerio de Ambiente de Colombia (MinAmbiente), las palabras de apertura estuvieron a cargo del Director de Gestión Integral de los Recursos Hídricos, Fabián Maurício Caicedo Carrascal. La disertación sobre la Gestión de los Recursos Hídricos en Brasil y

la importancia de las acciones previstas en la Política Nacional de Recursos Hídricos fue pronunciada por Flávia Carneiro da Cunha Oliveira, Superintendente de Planes, Programas y Proyectos de la Agencia Nacional de Agua y Saneamiento Básico (ANA) (Foto 25).



Foto 25. *Registro multimedia 14/06/2023. Auditorio del evento y mesa principal. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Se sugirió y aceptó un cambio en el horario del Taller debido al horario del vuelo de regreso de la delegación brasileña a la Capital. Así, en lugar de una pausa de 1:30 horas para el almuerzo, la reunión se desarrolló en sesión continua hasta las 14:00 horas hasta su clausura.

En representación de la UCR-SP/OTCA, Fernando Cisneros presentó el contexto del Proyecto de Implementación del PAE en la Cuenca Amazónica. A continuación, se presentó el contexto general de las aguas subterráneas en Colombia y su gestión por parte del Director de Gestión de Recursos Hídricos (MinAmbiente), Fabián Mauricio Caicedo Carrascal. Acto seguido, el Especialista en Regulación de Recursos Hídricos y Saneamiento Básico de la Coordinación de Aguas Subterráneas (ANA), Fabrício Bueno Cardoso, presentó el trabajo realizado y publicado por la ANA en 2015 en el contexto de la caracterización de aguas subterráneas en el municipio de Tabatinga, como parte del proyecto "Evaluación de los Acuíferos de las Cuencas Sedimentarias de la Provincia Hidrogeológica de Amazonas en Brasil y Ciudades Piloto" realizado en la región acuífera de Tabatinga, en el marco de un estudio realizado por la ANA publicado en 2015.

Luego de un receso de 20 minutos para el refrigerio, se realizó la presentación del trabajo realizado por la consultora SHI S.A.S, a cargo de la coordinadora técnica del estudio, Laura Chavarría, quien explicó la metodología aplicada para el desarrollo del estudio, el trabajo de campo ya realizado y los resultados obtenidos hasta el momento para los temas propuestos (Foto 26).



Foto 26. *Registro multimedia 14/06/2023. Intervenciones asociadas al proyecto. Entes coordinadores, ejecutores y unidades nacionales. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

Luego de la presentación, se compartió la propuesta de la red de monitoreo resultante del análisis de los resultados del estudio, la cual consta de 22 pozos del inventario, 4 puntos de la base de datos de ANA y la sugerencia de instalar 6 nuevos piezómetros.

Entre los parámetros químicos analizados, los resultados muestran en general niveles más altos en el agua muestreada de puntos de la red urbana de la ciudad de Tabatinga que en el agua de puntos distribuidos en zonas urbanas y rurales, expansión y parte del periurbano en Leticia. La empresa afirmó que la alta concentración de los parámetros puede estar relacionada con la dirección del flujo de agua subterránea, que sigue el curso del río Amazonas. Una vez presentada esta conclusión, hubo un amplio debate, ya que algunas variables cruciales fueron descartadas de la correlación causa-consecuencia de la contaminación, requiriendo más estudios para una evaluación más precisa.

Entre las notas objeto de discusión, que es necesario aclarar mejor antes de hacer una comparación superficial entre los elementos analizados, se destacan las siguientes:

- Preocupación por el hecho de que las muestras recolectadas en el casco urbano de Tabatinga han mostrado altos niveles de algunos elementos debido a la dirección de flujo del agua subterránea. De ahí la prioridad de definir qué puntos se identifican como posibles fuentes de contaminación, revisar los pozos sépticos que necesitan limpieza y mantenimiento, qué pozos no cumplen con las condiciones sanitarias mínimas y facilitan la contaminación puntual y/o no están completamente aislados.
- Cuestionamiento de la evaluación desconociendo variables importantes, como que el área de estudio en Tabatinga se limita al área urbana, mientras que Leticia presenta pozos

distribuidos espacialmente en áreas urbanas y rurales, expansión y parte del área periurbana, lo que constituye un sesgo en los resultados.

- Se sugirió que la calidad del agua para abastecimiento y consumo humano debe ser tratada como un tema prioritario de salud pública, y debe ser asumida por las direcciones municipales de salud de las dos ciudades y por los organismos estatales/departamentales de salud para la atribución de tareas y responsabilidades en esta gestión.
- Posibilidad de realizar el diagnóstico con base en una metodología con fundamentos estatales y federales que den como resultado políticas públicas de protección y prevención de la contaminación del agua. Sin embargo, en este momento es prioritario definir estrategias enfocadas a identificar fuentes de contaminación y su remediación.
- En la evaluación de las fuentes contaminantes, tener en cuenta todos los usos del suelo en ambas ciudades, como el cultivo con agroquímicos, la siembra de pastos para la ganadería extensiva y la minería. La empresa ya había identificado que la zona de estudio, es decir, el polígono amarillo, no cuenta con áreas agrícolas extensivas. No obstante, para estudios posteriores, sería recomendable analizar los niveles de metales pesados y pesticidas en estas aguas.

En este punto, es importante destacar que, dentro de los objetivos principales de la consultoría, se prevé la promoción de las sinergias necesarias para definir lineamientos y estrategias conjuntas para la implementación y operación de la red de monitoreo de aguas subterráneas de este acuífero transfronterizo. Fruto del intercambio entre los principales actores y las sugerencias presentadas, el debate cobra relevancia en futuros encuentros con el fin de obtener respuestas a dos interrogantes claves:

- ¿Qué entidades/organismos/personas estarían a cargo de realizar el seguimiento?
- ¿Qué entidades o fuentes de financiamiento existen para la implementación de la red de monitoreo?

Posteriormente, la coordinadora del estudio, María Victoria Vélez, lideró una dinámica cuyo objetivo fue promover el debate, intercambio de ideas, y directrices para el uso sustentable y protección de las aguas subterráneas en la región, así como para el funcionamiento de la red de monitoreo. El enfoque metodológico adoptado utilizó la dinámica japonesa denominada “Flor de Loto”. Este enfoque consiste en la delimitación y presentación, por parte del moderador, del problema central y los 3 principales condicionantes del problema. A partir de las aportaciones del grupo, a través de ideas, sugerencias y preguntas, se suman 3 condicionantes más del problema. De esta manera, a través de la dinámica Flor de Loto, se logró delimitar de manera conjunta los principales obstáculos en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en la región transfronteriza Brasil-Colombia y fueron resumidos en la Figura 134.

Con base en la Dinámica, el grupo identificó algunos cuellos de botella en la gestión del agua:

1. Hay poca articulación institucional en la región transfronteriza.
2. El problema relacionado con el tema del agua que es desconocido por la mayoría de la población local, que no tiene un acceso real a la información.
3. Es necesario difundir el conocimiento sobre las aguas subterráneas entre todas las clases sociales y económicas de la población, así como en los diferentes grupos de edad, desde la educación infantil.
4. Se deben generar espacios anuales para promover la discusión del tema, aprovechando los mecanismos binacionales existentes, como la Comisión de Vecindad.
5. Este tema podría ser incluido en la agenda de la Comisión de Vecindad, y debería ser apoyado por comisiones técnicas.
6. Es fundamental que la captación de aguas subterráneas sea regulada por las autoridades competentes de acuerdo con la legislación de cada país, y que se inicie el seguimiento de la calidad del agua y la inspección del estado general y sanitario de los pozos, con el fin de minimizar la posible contaminación por falta de aislamiento y estanqueidad de los pozos.
7. Es importante dimensionar la adecuación y sostenibilidad de un laboratorio local que opere de acuerdo con las normas nacionales y estatales para la realización de análisis fisicoquímicos del agua con miras al monitoreo de la calidad del agua.

Se resalta que queda una problemática sin integrar: ***Los pocos recursos para el monitoreo y control a la construcción y extracción de aguas subterránea y a los vertimientos de agua residuales domésticas*** y que se relacionan directamente con los puntos clave asociados a la red de monitoreo propuesta.

A las 14:15 hora colombiana se da por finalizada la reunión con un total de 39 asistentes de forma presencial (Foto 27). No fue posible establecer una conexión de internet estable para realizar una reunión virtual.



Foto 27. *Registro multimedia 14/06/2023. Asistentes y cierre del evento. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*



Limitante	Soluciones
1. Deficiencia en los servicios de Acueducto, Alcantarillado y recolección de basuras	1.1. Actualización del plan de ordenamiento territorial, acorde con GIRH. Secretarias de planeación territorial
	1.2. Empresas prestadoras de servicios públicos con tarifas diferenciales Soluciones integradas con corporaciones regionales
	1.3. Articulación de la entidad local compartida con las prestadoras de servicio para la gestión del recurso desde su captación hasta su descarga (Tratamiento de vertimientos conjunto)
	1.4. Distribución y tratamiento CONJUNTO del recurso en ambas ciudades
2. Infraestructura inadecuada de captaciones de agua subterránea (Ausencia de diseño, sello sanitario, profundidad, etc.).	2.1. Sellar captaciones con infraestructura inadecuada y centralizar la distribución
	2.2. Pozos asociados a agremiaciones y acciones comunales que ayuden a agrupar usuarios
	2.3. Campaña de identificación y legalización diferencial de usuarios
3. Pocos recursos para el monitoreo y control a la construcción y extracción de aguas subterránea y a los vertimientos de agua negras.	*Sin desarrollar*
4. Propuesta taller 1. Baja articulación institucional	4.1. Apoyarse de la Comisión de vecindad. 2022. Entidad con reconocimiento gubernamental
	4.2. Diálogos con autoridades locales en relación con los avances asociados a las problemáticas Binacionales
	4.3. Creación de un comité técnico para la generación de pautas locales de inmediata aplicación
5. Propuesta taller 2. Integración de zonas rurales en la región de Tabatinga debido al poco conocimiento de parte de la comunidad en relación con la calidad del recurso.	5.1. Diseñar estrategias para la difusión efectiva del conocimiento hidrogeológico
	5.2. Creación de comités hidrogeológicos binacionales
	5.3. Eventos y encuentros anuales binacionales. Indicadores de gestión
	5.4. Definir métodos para la capacitación de las personas encargadas del monitoreo
6. Formalización y fortalecimiento del personal técnico de las instituciones	6.1. Integración multidisciplinaria para nuevos resultados
	6.2. Ya existen capacitaciones gratuitas (Brasil). Es necesario divulgar acerca de estos espacios y afianzarlos
	6.3. Saneamiento y control de las captaciones. Formatos ecistentes de ambos paises
	6.4. Adecuar un laboratorio local, con equipos y capacitación para efectuar los análisis más rápidamente

Figura 128. *Resumen de la metodología "Flor de Loto". Delimitación parcial de problemáticas y soluciones. Fuente: OTCA & SHI SAS, (2023).*

12. DIRECTRICES PARA EL USO Y PROTECCIÓN DE FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA A NIVEL LOCAL

El agua subterránea es un recurso de gran importancia para la región, por lo que se deben proponer lineamientos para asegurar el uso sustentable y la protección de estos recursos. Para la elaboración de estas directrices se consideraron los principales problemas identificados en este estudio. Estos lineamientos surgen de las discusiones y debates que tuvieron lugar en los talleres regionales.

El enfoque principal de estas directrices es fomentar prácticas responsables que garanticen el uso adecuado de las aguas subterráneas y la disminución de las amenazas que ponen en peligro su disponibilidad a largo plazo. Asimismo, se busca establecer una cooperación sólida entre las instituciones de ambas regiones, con el propósito de abordar de manera conjunta los desafíos que conlleva la gestión de este recurso compartido. Es importante destacar que muchas de estas soluciones son producto del intercambio de ideas que tuvo lugar en el segundo taller regional.

Estas pautas marcan avances en la preservación y el uso sostenible de las aguas subterráneas en la región transfronteriza ubicada entre Leticia y Tabatinga. El éxito de su implementación dependerá en gran medida del compromiso y la colaboración activa tanto de las comunidades involucradas como de sus respectivas instituciones.

.

12.1. Principales problemáticas para el uso y gestión del agua subterránea

Durante la realización del presente estudio se identificaron una serie de problemas considerados como las principales limitantes para la gestión sostenible y el correcto aprovechamiento del agua subterránea, las cuales se indican a continuación y a partir de las cuales posteriormente se definieron las estrategias.

- **Mala calidad de agua subterránea por la deficiencia en los servicios de acueducto, alcantarillado y recolección de basuras**

Estos servicios públicos son prestados por la USPDL en Colombia y COSAMA en Brasil y se encontró que existe una gran parte de la población que no tiene acceso completo y constante a todos los tres servicios: acueducto, alcantarillado y recolección de basuras.

- **Infraestructura inadecuada de captaciones de agua subterránea**

Durante las actividades de campo se evidenció que en los pozos inventariados en la zona sus propietarios desconocen el diseño de estos, es decir, sello sanitario, material, profundidad, ubicación de las rejillas, etc., lo que da lugar a contaminaciones locales de las aguas subterráneas y genera desconocimiento de cuáles son los niveles del acuífero que se explotan.

- **Bajos niveles de articulación entre los actores de la gestión ambiental, territorial y de los recursos hídricos**

Estas dos ciudades pertenecen a dos países distintos y, por ende, la regulación ambiental y las metodologías usadas para analizar aspectos medioambientales son diferentes, así como la información técnica de cada país. Teniendo esto en cuenta, cuando se trata de la gestión del recurso hídrico subterráneo, esta se debe realizar de forma conjunta, pues se está explotando el mismo acuífero en ambos territorios.

- **Poco conocimiento de la comunidad sobre el recurso subterráneo**

En toda la región, los habitantes construyen pozos de agua subterránea para suplir sus necesidades sin tener condiciones técnicas adecuadas ni monitoreo de calidad de agua. Esto conlleva a que las aguas subterráneas contaminadas sean consumidas por la población y también al tener malas prácticas del uso del agua que genera deterioro del recurso.

- **Escaso personal técnico de las instituciones reguladoras del recurso en ambas ciudades**

Si bien las entidades encargadas del recurso en la región tienen personal capacitado para la fiscalización ambiental, este personal no es suficiente para la cantidad de captaciones subterráneas que requieren supervisión y para los problemas de contaminación que se presenta ambas ciudades.

12.2. Objetivos

- Promover la articulación institucional binacional para la gestión del acuífero transfronterizo.
- Fortalecer las capacidades técnicas y operativas de las instituciones.
- Garantizar la infraestructura adecuada de las captaciones de agua subterránea.
- Implementar monitoreos continuos de cantidad y calidad del agua subterránea y elaborar estrategias para mejorar la calidad del acuífero transfronterizo frente a la contaminación antrópica.
- Fomentar la educación ambiental y la divulgación de información sobre el uso del recurso hídrico.
- Mejorar el control y la gestión del acuífero binacional.
- Preservar las zonas de recarga y las fuentes de agua subterránea.
- Fomentar la participación comunitaria en la gestión del agua subterránea.
- Establecer mecanismos para la planificación conjunta de los recursos hídricos.

12.3. Directrices para el uso del recurso subterráneo

- **Articulación institucional regional conjunta para la gestión del recurso hídrico subterráneo**

Las entidades locales, tales como las alcaldías de ambas ciudades, los gobiernos departamental y estatal, los prestadores de servicios de acueducto y alcantarillado (USPDL – Colombia y COSAMA – Brasil), Corpoamazonía – Colombia, así como MinAmbiente – Colombia,y ANA, MIDR y MMA – Brasil son actores relevantes para lograr una gestión integrada y compartida del agua subterránea. Estas entidades deben estar articuladas y tener el mismo conocimiento y los mismos objetivos de uso y conservación del recurso hídrico subterráneo, para facilitar y mejorar su gestión.

Se destaca que las responsabilidades sobre la gestión de las aguas subterráneas difieren en cada país y están ligadas a distintos niveles de la estructura político-administrativa. En Tabatinga, la gestión de las aguas subterráneas es competencia del estado de Amazonas que la hace por medio de la SEMA y del IPAAM. Por su parte, en Leticia es competencia de CORPOAMAZONIA.

Se sugiere crear espacios anuales que promuevan la discusión aprovechando los mecanismos binacionales existentes, como la Comisión de Vecindad, que aborda diversos temas importantes en las ciudades fronterizas de Colombia y Brasil que deben ser analizados de manera conjunta por ambos países. Dado que esta comisión ya tiene reconocimiento gubernamental, las alcaldías, instituciones científicas y los ministerios de cada país (asociados con el recurso hídrico) podrían brindar su apoyo en este ámbito, incluyendo dentro de la agenda y los ejes temáticos de esta comisión , la protección y conservación de las aguas subterráneas, para que posteriormente las entidades competentes analicen como pueden incorporar este tema en sus presupuestos, planes y programas y puedan cooperar entre ambos países.

Asimismo, se propone la conformación de un comité técnico con el apoyo de las alcaldías, las secretarías de medio ambiente, CORPOAMAZONIA, IPAAM, ANA (de forma inicial) con el objetivo de generar pautas locales, de aplicación inmediata y en el mediano plazo, del correcto uso y gestión de aguas subterráneas, las cuales deben estar enfocadas en solucionar los problemas más críticos de forma expedita y atender mejor la población. Estos comités son muy importantes pues estarían a cargo, en el marco de sus competencias, de vigilar la aplicación de las políticas de protección y uso de aguas subterráneas.

Debido a la naturaleza compartida de responsabilidades respecto al aprovechamiento del acuífero, es necesario realizar reuniones periódicas como mínimo una vez al año, ya sea presenciales, virtuales, o ambas, y presentar reportes, organizar estrategias conjuntas, analizar problemas, discutir soluciones y planear la gestión compartida a futuro.

Adicionalmente, se propone la implementación de indicadores para el monitoreo eficiente del recurso, que pueden ser implementados por parte de las entidades prestadores del servicio: COSAMA – Brasil, y USPDL – Colombia (Tabla 76). Estos indicadores deben ser los mismos, servir para conocer la realidad actual de la zona y el progreso en el tiempo y, por tanto, facilitar la tomar decisiones sobre la gestión del recurso. Para esto se deben actualizar y compartir los

datos existentes, como lo son los índices de pérdidas del sistema y el porcentaje de la población que tiene acceso a los servicios públicos de las entidades; además, se debe realizar una estimación de la demanda futura de agua superficial, subterránea y de la oferta de forma más detallada, considerando los registros históricos completos de los censos, suscriptores, consumos y dotación.

A continuación, se propone la implementación de los siguientes indicadores obtenidos del estudio de ANA (2019):

Tabla 76. *Indicadores para el monitoreo del recurso hídrico subterráneo. Fuente: Modificado de ANA (2019).*

Tipo de indicador	Indicador	Unidad
Demanda	Explotación actual / Demanda para consumo humano	%
	Explotación actual / Demanda total	%
Disponibilidad	Reservas explotables / población total	L/hab/día
	Explotación actual / Reservas explotables	%
Calidad	Áreas con peligro elevado o muy elevado / Área total de estudio	%

Estos indicadores y otras informaciones relevantes como usos, usuarios y consumos deben ser actualizadas mínimo una vez al mes y compartirlas y publicarlas para el libre acceso de la comunidad o interesados.

- **Fortalecimiento institucional y de personal técnico para la gestión de recursos hídricos subterráneos**

El fortalecimiento de las autoridades ambientales y responsables de la gestión del recurso hídrico es crucial para asegurar una gestión sostenible del agua; estas instituciones tienen la capacidad de establecer y hacer cumplir normativas que previenen la sobreexplotación y contaminación de los cuerpos de agua y acuíferos. Además, de implementar estrategias de conservación, y mitigación de impactos ambientales, promoviendo un equilibrio entre el desarrollo económico, la protección del medio ambiente y la adaptación al cambio climático. La colaboración entre diversas entidades, incluyendo entidades públicas, privadas e instituciones educativas, refuerza la base de conocimientos y recursos disponibles para una toma de decisiones más informada.

Si bien las instituciones encargadas de administrar estos recursos cuentan con mecanismos de gestión adecuados, es imperativo otorgarles más recursos tanto financieros como técnicos y humanos, para garantizar un control más eficiente de los mismos.

Por lo tanto, el fortalecimiento de las distintas entidades involucradas, como las corporaciones ambientales, instituciones universitarias y de investigación, alcaldías y juntas comunales, es esencial para lograr una solución efectiva a estas problemáticas, asegurar una gestión sostenible y eficiente del agua en Leticia y Tabatinga.

Así mismo, las entidades ambientales deben contar con financiamiento adecuado que permita fortalecer su capacidad operativa, el personal debe contar con el conocimiento y capacitación técnica necesaria para realizar las actividades con calidad, eficiencia y estar preparados para abordar los posibles desafíos que se puedan presentar, y se debe revisar y optimizar los procesos

internos para garantizar que la toma de decisiones sea ágil y eficiente. De manera específica, para garantizar la ejecución correcta y eficaz de las labores de monitoreo de los puntos de agua subterránea, es indispensable invertir en la capacitación del personal técnico de las entidades ambientales, priorizando el fortalecimiento de habilidades relacionadas con metodologías de muestreo y conservación de muestras.

El fortalecimiento institucional también se refleja en la estandarización del registro y análisis sanitario de las captaciones. Para ello, se recomienda seguir empleando los formatos existentes, como el FUNIAS en Colombia y el *"Cadastro de Fontes de Abastecimento por Águas Subterrâneas"* en Brasil. Estos formatos son fundamentales para recolectar los datos esenciales de las captaciones inventariadas y promover una vigilancia más efectiva.

En el caso de las universidades o centros de investigación, se requiere de financiamiento para los programas de investigación, especialmente de aquellos en temas relacionados con la calidad del agua y la gestión sostenible de los recursos hídricos, así como una dotación de los instrumentos de laboratorio y equipos técnicos. En este sentido, se recomienda instalar y acreditar un laboratorio de análisis local, ya sea en Tabatinga o Leticia, para agilizar el análisis periódico de muestras de captaciones y, de esta forma, evitar que las muestras lleguen vencidas al laboratorio y permitir la emisión oportuna de alertas por parte de la seccional de salud. Para lograrlo, se requiere no solo recursos financieros, sino que es necesario establecer colaboraciones sólidas con instituciones educativas y de investigación, como la Universidad de la Amazonía, la Universidad Nacional, la Universidad del Estado del Amazonas (UEA), el Instituto SINCHI – Colombia y el IFAM - Brasil.

En el caso de las alcaldías su fortalecimiento se requiere la capacitación del personal en gestión de proyectos y regulaciones ambientales y en generar canales eficientes de comunicación para promover la transparencia entre las diversas entidades y la comunidad.

Un aspecto crítico que demanda atención es la limitada cobertura del servicio de alcantarillado en la región. En Leticia, solo la mitad de la población tiene acceso a este servicio, mientras que en Tabatinga es prácticamente inexistente. Por ende, es esencial aumentar la cobertura de servicio de acueducto y alcantarillado y reducir los vertimientos descontrolados, ya sea mediante un incremento de los recursos financieros y técnicos de las empresas prestadoras de estos servicios, a través de alianzas estratégicas con entidades públicas o mediante el desarrollo de un plan de expansión de los servicios de acueducto y alcantarillado dentro de los planes de ordenamiento territorial de cada ciudad, en apoyo con las secretarías de planeación territorial.

En concordancia con esto, se deben asignar los recursos necesarios para identificar fugas en el sistema y realizar una mejora completa de la red de acueducto y alcantarillado. Además, para mejor el ingreso de los recursos económicos para la operación de estos sistemas en ambas ciudades, se puede evaluar que las empresas prestadoras de servicios públicos tengan tarifas diferenciales en ambas ciudades, acorde con los niveles socioeconómicos de cada ciudad (estratos). En relación con las captaciones subterráneas de abastecimiento público, se debe impulsar soluciones integradas con las entidades responsables, lo cual requiere una supervisión más intensiva.

- **Construcción, monitoreo y mantenimiento de la infraestructura de captaciones de agua subterránea**

Como se mencionó anteriormente, existe un uso indiscriminado del agua subterránea en la región; se desconocen las características de los pozos (como datos constructivos, flujos, información de calidad) y no hay manera de gestionar adecuadamente lo que no se conoce. Como resultado, la extracción de agua ocurre de manera irregular y no se tiene una comprensión precisa de los niveles de explotación en el acuífero al no disponer de información detallada sobre el diseño de los pozos. Para abordar esta situación, es necesario llevar a cabo una campaña de identificación y legalización diferenciada de todas las captaciones de agua subterránea en la región, liderada por CORPOAMAZONIA en Colombia e IPAAM en Brasil cuyo objetivo principal sea evaluar las condiciones sanitarias y legales de las captaciones. Además, este proceso de identificación y legalización no debe resultar en sanciones ni cargos económicos para los usuarios, sino que debe centrarse en registrar las características de los pozos y la cantidad de agua explotada.

Es fundamental destacar que, si bien en Colombia los pozos destinados a uso doméstico en propiedad del beneficiario o en predios que éste tenga posesión o tenencia no requieren de una concesión de la autoridad ambiental, si se requieren para el resto de los usos (Decreto 1076 de 2015); en el caso de Brasil, específicamente en Tabatinga, las aguas públicas que son propiedad del Estado sólo pueden derivarse para cualquier consumo, incluido el abastecimiento público, previa concesión por el IPAAM (Resolução CERH-AM N° 01 de 2016).

Por otro lado, para garantizar la construcción adecuada de las futuras captaciones, es recomendable seguir los lineamientos de la NTC 3948 del ICONTEC donde se dan las especificaciones técnicas para la construcción de captaciones subterráneas, en Colombia. En el Estado del Amazonas en Brasil, todos los pozos y otras obras de captación de aguas subterráneas deben seguir las determinaciones contenidas en las normas técnicas NBR-12.244/1992 y NBR 12.212/2006 y todos los pozos deben ser construidos por una empresa calificada, registrada en el IPAAM (Resolução CERH-AM N° 01 de 2016).

Además, se debe incentivar tanto a los usuarios como a los constructores a informar sobre nuevas perforaciones y compartir estos registros con las entidades de servicios (USPDL en Colombia y COSAMA en Brasil), así como con las autoridades municipales y entidades ambientales, con el fin de tener un registro actualizado y completo de las captaciones.

Para el monitoreo de las condiciones del agua y de los pozos, se recomienda la implementación de la red de monitoreo propuesta en este estudio y considerar su expansión con el tiempo, especialmente hacia áreas no cubiertas en este análisis, como la zona rural de Tabatinga. En el caso de que los usuarios detecten cualquier anomalía en el agua, como turbidez elevada o sabores inusuales, es fundamental establecer canales de alerta, como líneas telefónicas especiales, correos electrónicos o plataformas en línea, a través de las entidades de salud pública u otras entidades pertinentes.

Por último, se sugiere evaluar la necesidad de utilizar aguas subterráneas en el futuro, ya que la región cuenta con una abundante disponibilidad de aguas superficiales. Se propone explorar opciones de uso conjunto, con el objetivo de aliviar las presiones del acuífero, y considerar la clausura de pozos en malas condiciones de operación.

Si se decide continuar con el uso de aguas subterráneas, se debe propender la construcción de pozos que sean propiedad de asociaciones locales o juntas de acción comunal, con el objetivo de evitar un incremento descontrolado de captaciones informales y excesivas. Adicionalmente, para asegurar un suministro continuo y de calidad de agua superficial y subterránea, se recomienda la colaboración con acueductos municipales o comunitarios.

- **Educación ambiental y divulgación de la información sobre el agua subterránea**

Uno de los aspectos que más contribuye a la administración deficiente del agua subterránea es que los usuarios no conocen los programas que tienen las diferentes entidades gubernamentales para la evaluación y control del acuífero transfronterizo, ni conocen los mecanismos adecuados para la construcción de captaciones, es por eso que las diferentes entidades y las prestadoras de servicios públicos deben crear comités hidrogeológicos para hacer campañas de divulgación de programas del cuidado del agua, de inventarios de captaciones y registros de usuarios, de muestreos de calidad e incentivar la participación en estos programas y educar sobre las buenas prácticas a la hora de construir y usar las captaciones. Este paso es uno de los más importantes, pues si los usuarios conocen sobre la correcta gestión de las captaciones, los mecanismos de control propuestos en este estudio serán más fáciles de implementar, pues las personas estarán dispuestas a colaborar.

Por otro lado, la información técnica sobre las captaciones, los usos y consumos de agua, cantidad de usuarios de aguas subterráneas, resultados de monitoreos, mapas temáticos, y estudios pertinentes sobre el acuífero transfronterizo, debe ser de fácil acceso e idealmente estar en un portal gubernamental en línea para que cualquier persona pueda acceder y hacer uso de la información.

- **Monitoreo, control y mejora de los planes de control y vigilancia de las aguas subterráneas**

Con el fin de verificar la articulación institucional y el cumplimiento de las políticas para el uso eficiente y protección de los recursos hídricos subterráneos, se propone la realización de eventos binacionales y encuentros anuales, para avanzar año tras año en la construcción de políticas robustas para el uso eficiente y la conservación, buscando tomar en cuenta las realidades de ambos países, socializar problemas, proponer iniciativas e intercambiar conocimientos.

Las instituciones responsables de los servicios públicos están reguladas por distintos organismos que deben incluir el tema de las aguas subterráneas en sus planes de saneamiento básico. COSAMA en Brasil debe destinar recursos a acciones para fortalecer el servicio y, principalmente, la red de alcantarillado sanitario. En el caso de la USPDL en Colombia, también debe asignar los recursos necesarios para identificar fugas en el sistema y realizar una mejora completa de la red.

- **Protección de zonas de recarga del acuífero y de las fuentes de agua subterránea**

El acuífero se encuentra en toda la zona transfronteriza y depende en gran parte de las aguas del río Amazonas. Las principales afectaciones a la calidad de las aguas subterráneas se dan por vertimientos sin control y fuentes puntuales como los rellenos sanitarios, mataderos y otros puntos de contaminación.

El primer paso para proteger este recurso implica incorporar en los instrumentos de planificación y ordenamiento urbano las áreas estratégicas establecidas por las autoridades ambientales, las cuales están destinadas a la protección de las aguas subterráneas y de los servicios ecosistémicos que de ellas derivan. Estos instrumentos son los planes de ordenamiento territorial que existen en ambas ciudades y su elaboración es responsabilidad de las alcaldías, por medio de las secretarías de planeación territorial. De este modo, las secretarías de planeación deben tener en cuenta los problemas de contaminación del agua que existen y actualizar estos planes de ordenamiento acorde con el uso y la disponibilidad del agua tanto superficial como subterránea. Lo que se recomienda en este caso es que, debido a la importancia del río Amazonas como fuente principal de recarga, velar por la protección de las márgenes y de las zonas de inundación del río, permitiendo el flujo normal del agua desde el río hacia el acuífero. Otra de las recomendaciones es, mientras se contempla la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, no verter aguas negras directamente al suelo o a los cuerpos de agua superficiales.

Adicionalmente, es fundamental aplicar medidas de control de contaminación en las diferentes actividades que pueden afectar la calidad de las aguas subterráneas y, en este sentido, las autoridades ambientales deben supervisar el cumplimiento de los planes de manejo ambiental. Por ejemplo, en el caso de las plantas termoeléctricas y estaciones de servicio, se requiere inspección y mantenimiento regular de equipos, tanques y tuberías para detectar fugas y prevenir migración de combustibles. Por su parte, en rellenos sanitarios es esencial instalar bases impermeables, recolectar y tratar los lixiviados antes de la descarga, gestionar las aguas pluviales y monitorear los gases. Además, se requiere la implementación de campañas de campo y de otras estrategias que permitan la identificación minuciosa de fuentes potenciales de contaminación del acuífero binacional para, posteriormente, establecer e implementar soluciones para su remediación, en caso de que aplique.

Otro instrumento que es de mucha utilidad para la toma de decisiones es un modelo numérico de aguas subterráneas dado que, dependiendo de la calidad de los registros históricos que se empleen, permite simular el comportamiento real del acuífero de una forma muy precisa (claro está que depende de la calidad de información que se ingrese en este), por lo que su construcción puede mostrar las fluctuaciones de los niveles por las extracciones de agua, el cambio en el comportamiento por perímetros urbanos impermeables, el movimiento de los contaminantes en el suelo, y la extensión necesaria de los perímetros de protección de los pozos. Con toda esta información, adicional a la carga contaminante y peligro de contaminación, se pueden definir áreas dentro de los municipios que permitan, limiten, o prohíban actividades que puedan contaminar las aguas subterráneas y las superficiales.

En los análisis hidrogeológicos, se deben tener en cuenta los efectos del cambio climático, que produce eventos climáticos extremos y prolongados, y cuyas consecuencias son sequías prolongadas e inundaciones severas, para lo cual los sistemas de abastecimiento de agua y de alcantarillado deben estar preparados, pues de estos depende la población para sus necesidades diarias. Por lo tanto, es esencial establecer la demanda futura de aguas subterráneas de una forma más precisa con series de datos más completas, para saber si la disponibilidad del agua subterránea puede suplir la demanda y, en caso contrario, buscar mecanismos diferentes como captación de aguas lluvias o mayor capacidad de captación de agua superficial.

- **Participación comunitaria en la gestión del agua subterránea**

Se sugiere realizar campañas masivas de sensibilización a la población sobre la importancia del acuífero y sobre las entidades gestoras del recurso, así como la difusión de la información ambiental relevante del acuífero en portales en línea con acceso libre. También es importante dar a conocer las campañas de monitoreo para contar con el apoyo de los dueños de las captaciones y evitar una comunidad desconfiada de brindar información por temor a comparendos ambientales.

Los usuarios de aguas subterráneas también pueden participar en la construcción de las políticas de gestión y del ordenamiento ambiental del territorio para lo cual se pueden proponer también ejercicios de cartografía social, en donde la comunidad y las entidades interesadas pueden señalar lugares donde se ha evidenciado contaminación local, y ampliar y fortalecer el inventario de fuentes de contaminación.

- **Planificación conjunta de los recursos hídricos subterráneos**

De toda la información hidrológica, hidrogeológica, territorial, ambiental, legal, institucional, social, económica, y de las intervenciones realizadas por la comunidad, puede surgir la información base para la construcción de un plan de manejo integral del acuífero (en Colombia, responsabilidad de CORPOAMAZONÍA), que contenga todos los elementos necesarios para prevenir la sobreexplotación, garantizar disponibilidad del agua y asegurar el uso sostenible del recurso, por medio de aspectos técnicos, económicos, financieros, sociales, y de protección ambiental, que se han recopilado a lo largo de todos los estudios sobre el acuífero. En el caso de la legislación brasileña en la cual este instrumento no está previsto estos elementos deben ser presentados en los planes de cuenca hidrográfica, en este caso la cuenca del río Amazonas.

Este documento tendrá toda la información necesaria para la toma de decisiones sobre el acuífero que satisfagan las necesidades de las ciudades de Leticia y Tabatinga, y que permita conocer el estado en el que se encuentra el acuífero, para poder plantear escenarios de uso, políticas de gestión, y mitigación de problemas.

13. CONCLUSIONES

- La región transfronteriza es una zona con uso histórico del recurso hídrico subterráneo, con un registro cercano a los 3000 puntos de agua en las dos cuidades (Leticia, Colombia y Tabatinga, Brasil). En su mayoría son de uso doméstico, pero en los últimos años por la creciente demanda turística se han incluido usos industriales y recreativos.

- Las captaciones son principalmente pozos perforados que en su gran mayoría no sobrepasan los 20 m de profundidad, con sistemas de distribución directa por tuberías y en algunos casos puntuales, con tanques de acumulación para su posterior distribución.

- El diagnóstico sanitario de las captaciones, basado en sus características y estado constructivo, es en general adecuado para el 69% de las captaciones inventariadas, moderado para el 16% y únicamente 10 puntos presentan falencias en términos de su infraestructura, faltando principalmente sellos sanitarios y pisos de cemento adecuado que impidan el paso de contaminantes cercanos a la captación.

- Dentro del análisis la evaluación de las fuentes potenciales de contaminación inventariadas en un radio de 150 metros a la redonda del punto de captación se evidenció que únicamente 9 puntos están relacionados con posibles contaminantes directos, de los cuales 2 corresponden a vertimientos de aguas residuales domésticas, 2 a estaciones de servicio, 2 a pozos sépticos domésticos y 2 a pozos de agua abandonados. El punto restante se asocia con la relativa cercanía del punto PZ-NM-01 (800 metros de distancia) al relleno sanitario de la ciudad de Leticia (FC-DM-01).

- De las captaciones identificadas en la actualización del inventario de puntos de agua, el 59% están asociados a fines domésticos, el 15% para consumo humano y doméstico colectivo como colegios, entidades educativas, entidades gubernamentales, iglesias, entre otras, el 7% para usos doméstico/industriales y el 19% restante corresponde usos de abastecimiento público, fines industriales, recreativos y pecuarios. En total se registran 5.240 usuarios del agua subterránea, donde el uso para consumo humano y doméstico colectivo y el abastecimiento público abarcan el 52% y 26% de los usuarios respectivamente.

- De los diferentes escenarios probables y proyecciones de población, se espera que la región transfronteriza tenga aproximadamente 134.000 habitantes para el 2044, de los cuales 86.000 personas habitarán en Tabatinga, y 48.000 en Leticia, lo que significa que los habitantes de Tabatinga representarán el 63% de la población, y Leticia representará el 36% al año 2044.

- Para el caso de Leticia, el comportamiento de la dotación neta muestra una progresión creciente hasta el 2008 pero decreciente hasta el 2022, las mayores dotaciones se presentan en el estrato 1 y 2, alcanzando su máximo en el 2008 pero disminuyendo para 2022 y para Tabatinga, se observa que las dotaciones disminuyeron progresivamente entre el 2008 y el 2022, pasando de 81 a 50 l/hab/día, esto puede deberse a que la población prefiere abastecerse por medio de pozos de agua subterránea individuales.

- La demanda total de agua en la región transfronteriza para 2044 estimada según el escenario tendencial será de aproximadamente 6’370.000 m^3/año. De estos, 1’350.000 m^3/año corresponden a demanda de agua subterránea. Estos volúmenes representan una importante presión sobre el acuífero, sin embargo, estas son estimaciones aproximadas y se debe cuantificar además de la demanda, la oferta de aguas subterráneas en la región de manera más detallada.

- En cuanto a las cargas contaminantes potenciales el 70% de la zona de estudio está expuesta a cargas con bajo potencial de contaminación y el 12% a cargas con alto potencial de contaminación localizadas en la zona urbana de Tabatinga y al sur de la zona urbana de Leticia.

- La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero mapeada mediante el método GOD mostró que el 70% de la zona de estudio corresponde a vulnerabilidad media y el 21% a vulnerabilidad alta, las cuales se ubican sobre el acuífero aluvial y donde la mayor vulnerabilidad está asociada a zonas con niveles de agua someros; el porcentaje restante está asociado a vulnerabilidades bajas o muy bajas. Por su parte, al analizar los resultados obtenidos mediante el método DRASTIC se observa que cerca el 76% del área de estudio se encuentra en niveles de vulnerabilidad media y el 23% en vulnerabilidad alta, estás últimas asociadas principalmente a niveles someros del agua subterránea, similar a los observado en el método GOD. El 1% restante corresponde a zonas de vulnerabilidad baja.

- Los resultados de la evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea obtenidos al considerar la vulnerabilidad por el método GOD y por el método DRASTIC son similares; no obstante, la principal diferencia radica en que las zonas de peligro reducido, las cuales abarcan una mayor área al considerar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero por el método GOD respecto al método DRASTIC. De manera general, al analizar toda el área de estudio se observa que aproximadamente el 55% de la misma se ubica en zonas donde el peligro de contaminación es reducido y moderado, mientras que cerca del 45% corresponde a zonas de peligro elevado y muy elevado, ubicadas principalmente en el sur de Leticia y en la zona urbana de Tabatinga.

- Entre las estrategias propuestas para prevenir o reducir la contaminación del acuífero se encuentra la planeación adecuada del uso del suelo mediante los mapas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación o perímetros de protección para captaciones prioritarias; la verificación de manera regular, por parte de las autoridades ambientales competentes, del cumplimiento de los permisos ambientales de las industrias o actividades potencialmente contaminantes; la implementación de sistemas de recogida y tratamiento para la gestión adecuada de las aguas residuales; la construcción de las captaciones de agua subterránea por profesionales y según las pautas establecidas para tal fin; y la inclusión de la comunidad en las diversas iniciativas enfocadas en la protección los recursos hídricos.

- La superficie potenciométrica indica una dirección general del flujo regional en sentido norte-sur en dirección hacia el río Amazonas cuerpo de agua principal en la zona. El

muestreo hidroquímico corroboró que el agua subterránea fluye desde la zona noroeste de Leticia hacia Tabatinga, mostrando el incremento de iones mayoritarios como el Na y Cl hacia la zona brasileña.

- Los valores elevados de nitratos y coliformes se infiere que son producto de contaminación antrópica local en cada pozo; ligada a infiltraciones provenientes de pozos sépticos, vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales o interacción con aguas superficiales contaminadas cercanas a los puntos.

- La calidad del agua en los puntos inventariados da cuenta de una estrecha conexión del recurso subterráneo, con los cuerpos de agua superficial en la zona y con la recarga reciente; ya que, en general el agua captada presenta valores bajos de conductividad eléctrica y solidos disueltos, y valores relativamente altos en oxígeno disuelto, así mismo los diagramas de Stiff mostraron agua poco mineralizada con un ligero aumento de los iones mayoritarios hacia Tabatinga.

- De manera general, el 24% de los puntos de monitoreo en Leticia cumple con la normativa colombiana para uso doméstico y el 76% supera el valor límite en al menos un parámetro; por su parte, todos los puntos empleados para consumo humano presentan valores de pH inferiores a lo estipulado en la normativa y, considerando los parámetros restantes, el 50% de los puntos son aptos para consumo humano mientras que el 50% restante presenta valores altos en parámetros como turbiedad, hierro o coliformes antes de tratamiento. Para el caso de Tabatinga, el 30% restante cumple con los valores limites expresados en la resolución brasileña y el 70% de los puntos no cumplen con la normativa, registrando valores elevados en parámetros como turbidez, hierro y manganeso total y disuelto, y la presencia de coliformes y E-Coli.

- De manera general, se presentan valores altos en coliformes fecales y E. Coli en el 22% de los puntos ubicados en la zona de Leticia y Tabatinga, lo cual podría estar asociado a que el sistema de alcantarillado en la región es altamente deficiente.

- La red de monitoreo de cantidad y calidad del agua subterránea propuesta para su implementación en el corto o mediano plazo comprende 32 puntos, entre los que se encuentran 22 pozos de la red de monitoreo preliminar, 4 del inventario de la ANA y se propone la construcción de 6 piezómetros.

- Para llevar a cabo el monitoreo de niveles se proponen dos escenarios. En el primer escenario la medición de los niveles debe ser realizada de forma manual por un técnico dos veces al mes. En el segundo escenario, cada pozo que conforma la red de monitoreo debe estar equipado con un *datalogger*, para la toma automática de niveles cada hora; en este caso los registros deben ser descargados manualmente cada 3 meses o enviados remotamente por telemetría.

- El monitoreo de calidad debe realizarse, idealmente, 2 veces en época seca y húmeda y entre los parámetros mínimos recomendados se encuentran: temperatura, turbidez, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, alcalinidad total, dureza, cationes y aniones, Fe, Mn, Al, NO_2^-, NO_3^-, DQO, DBO_5 y los análisis microbiológicos de coliformes termotolerantes, totales y escherichia coli.

- Las muestras recolectadas en la zona urbana de Tabatinga mostraron niveles más altos para algunos elementos, posiblemente debido a la dirección del flujo de agua subterránea, que sigue el curso del río Amazonas. De ahí la prioridad de definir qué puntos se identifican como posibles fuentes de contaminación, verificando si los pozos sépticos más antiguos necesitan limpieza y mantenimiento, qué pozos de recolección no cumplen con las condiciones sanitarias mínimas y facilitan la contaminación puntual y/o no están totalmente aislados.

- El tema de la calidad del agua para abastecimiento y consumo humano es un tema que debe ser tratado como un tema prioritario de salud pública, y debe ser asumido por las secretarías de salud municipales de las dos ciudades y por los organismos estatales/departamentales de salud para la atribución de tareas y responsabilidades en esta gestión. En este sentido, se busca la posibilidad de realizar el diagnóstico a partir de una metodología con fundamentos estatales y federales que den como resultado políticas públicas de protección y prevención de la contaminación del agua. Sin embargo, en este momento es prioritario definir estrategias enfocadas en identificar fuentes de contaminación y encontrar soluciones para la remediación.

- Con el fin de implementar y garantizar la ejecución sostenible de la red de monitoreo del acuífero transfronterizo propuesta, como resultado del estudio realizado con el apoyo de la OTCA, la Secretaría de Medio Ambiente de Tabatinga propondrá la inclusión del tema en la agenda binacional de la implementación de la red de seguimiento automático de los 32 puntos identificados en la próxima agenda de la "Comisión Binacional de Vecindad y de Integración Binacional Brasil-Colombia". Esta Comisión es un instrumento de integración que permite la cooperación entre las ciudades fronterizas de Colombia y Brasil, como Leticia y Tabatinga. En el caso de Colombia, la Cancillería también expresó su apoyo e interés en este punto, sin embargo, manifestó que su inclusión en la agenda binacional estará sujeta a la aprobación de las autoridades locales y nacionales/estatales/federales. Por otro lado, los participantes acordaron que los ministerios de salud, CPRM, SGC, SEASE, universidades públicas y privadas, institutos de investigación y otras entidades afines serán relevantes en la discusión. Para la agenda de la Comisión Binacional y de Integración, las partes convocarán a las instancias que deban participar, incluyendo instituciones Departamentales/Estatales y nacionales/federales (ANA e IPAAM en el caso de Brasil y Dirección de Gestión Integral de Recursos Hídricos-MinAmbiente en el caso de Colombia).
- La Secretaría de Agricultura, Ambiente y Productividad de la Gobernación del Amazonas (Colombia), ha manifestado su interés en formar una alianza estratégica para el monitoreo de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas transfronterizas a través de su equipo técnico profesional y utilizando equipos portátiles

multiparamétricos. Asimismo, y de acuerdo con los planes de manejo establecidos para las áreas de interés ambiental adquiridas por la entidad territorial en cumplimiento de lo dispuesto en el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 y demás normas, se deberán realizar acciones de educación y concientización ambiental en el área de influencia de la microcuenca de la quebrada Yahuarcaca en el municipio de Leticia, como fuente de abastecimiento del acueducto municipal. Además, deberá coordinar acciones con las entidades nacionales presentes en la triple frontera para garantizar la Gestión Integral de los Recursos Hídricos del territorio.

- En cuanto a las consecuencias del estudio, las autoridades locales harán un llamado a las autoridades de salud para que tomen medidas sobre los resultados de la calidad del agua y el uso para el consumo humano.

14. RECOMENDACIONES PARA EL ESCALAMIENTO EN LA CUENCA AMAZÓNICA

En los próximos años, la probabilidad de que más personas se sumen a la clase media en el mundo es cada vez mayor, y trae consigo un aumento en la demanda de recursos naturales, ya amenazados. En ese sentido, las soluciones a algunos de los principales problemas a los que se enfrentan los seres humanos como la pobreza, el cambio climático, la asistencia sanitaria y la educación deben encontrarse en la vida de las ciudades y deben plasmarse en acciones sinérgicas fundamentadas en la puesta en práctica de los objetivos sostenibles (Figura 129).



OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades

Objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos

Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos

Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles

Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles

Objetivo 17: Revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible

Figura 129. *Objetivos de desarrollo sostenibles clave para el escalamiento. Fuente: OTCA & SHI SAS (2023).*

El costo de una deficiente planificación urbanística y ambiental puede provocar inseguridad, la contaminación, deterioro de la salud y afectación a la productividad de los trabajadores y por tanto a la economía, y los desastres naturales y el cambio climático, pueden alterar el estilo de vida general *(ODS-11-ONU).* Bajo esta premisa, y teniendo en cuenta el contexto socioambiental asociado al acuífero transfronterizo, es preciso comprender mejor los efectos ambientales y sociales de los productos y servicios, tanto de los ciclos de vida de los productos como de la forma en que estos se ven afectados por su utilización en los estilos de vida, los cuales en consecuencias generan impactos directos sobre el ecosistema circundante *(ODS-12-ONU).*

Para el caso de la intervención del presente documento, la relación entre la prestación de servicios adecuados de abastecimiento de agua y sistemas de saneamiento es esencial dentro de la planificación, puesto que la contaminación de las aguas es quizás la cuestión más apremiante que exige una solución sostenible *(ODS-6-ONU).* Mediante la gestión sostenible de los recursos hídricos, es posible gestionar mejor las actividades productivas y contribuir al crecimiento económico, además de la preservación de los ecosistemas hídricos y su diversidad biológica, como medidas para combatir el cambio climático.

Concientizar sobre estos objetivos y convertirlos en medidas concretas producirá resultados ventajosos para la comunidad en términos de salud y bienestar *(ODS-3-ONU)* y conllevará una mayor sostenibilidad e integridad de los sistemas humanos y ecológicos. Este compromiso implica a su vez un proceso educativo concreto y bien estructurado que permita apropiar el conocimiento general de la comunidad y su relación con una vida saludable y sostenible *(ODS-4-ONU)*, con las herramientas de monitoreo y con las buenas prácticas medioambientales.

Las alianzas de múltiples interesados serán fundamentales para aprovechar la integración entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus entes garantes, a fin de mejorar su eficacia y repercusión y acelerar los progresos *(ODS-3-ONU)*. Considerando el escalamiento de una intervención similar en otros lugares de la cuenca amazónica y buscando replicar todas las buenas prácticas y recomendaciones técnicas para la gestión integral del recurso hídrico, a continuación, se indican algunas recomendaciones:

- Es fundamental que se realice una campaña de socialización como mínimo un mes antes al inicio de las actividades de campo, con personas que tenga perfiles idóneos (trabajadores sociales), para ir a las comunidades indígenas, barrios y entidades, a sensibilizar a las personas con la importancia de estos estudios para la región e involucrar a todos los interesados en la gestión y uso del recurso hídrico. Esta actividad previa facilitará las labores de campo de la consultora, evitará retrasos, asegurará la adquisición de gran cantidad de datos dentro de estudio y minimizará los riesgos públicos para el personal que está en campo.

- Es importante que haya una mayor participación de las corporaciones o entidades ambientales que se encargan de regular el recurso hídrico en la zona, que dentro de la intervención dichas entidades hagan parte del acompañamiento a las actividades de campo, porque esto va permitir que la entidades conozcan de primera mano la información que se está recolectando, hacer aportes y facilitar la recolección de información, en tanto la comunidad en general siente mayor confianza cuando la visitas están acompañadas de entidades de la región.

- Es recomendable que, en estudios transfronterizos, el área de la intervención de cada país sea similar en extensión e incluya tanto la parte rural como la urbana, esto para que los análisis de zonificación como vulnerabilidad, peligro, cargas contaminantes, entre otros, puedan ser comparables entre las dos ciudades y de esta forma poder identificar criticidades que no tengan sesgos por la distribución de las áreas.

15. CONTROL DE ANEXOS

Anexo_00_InformesAntecedentes

Anexo_01_ReportesTrimestrales

Anexo_02_PrimerTallerRegional_2022

Anexo _03_PuntosDeAgua

Anexo_04_FuentesdeContaminacion

Anexo_05_CalidadAgua

Anexo_06_FigurasPNG

Anexo_07_Cronograma

Anexo_08_InformaciónBase

Anexo_09_Demanda

Anexo_10_BasesDeDatos

Anexo_11_SegundoTallerRegional

Anexo_12_GDB_Mapas

Anexo_13_RedMonitoreo

16. REFERENCIAS

ANA. (2007). *Panorama do Enquadramento dos Corpos d'Água do Brasil - Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil.* Brasilia: Caderno de Recursos Hídricos, 5.

ANA. (2015a). *Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000). Volume II - Geologia da Provincia Hidrogeológica Amazonas.* Brasilia.

ANA. (2015b). *Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000). Volume III – Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da PHA no Brasil.* Brasilia.

ANA. (2015c). *Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:100.000) e cidades piloto (1:50.000) (Borrador) Volume IX: Cidade piloto: Tabatina - AM.* Brasilia.

ANA. (26 de Septiembre de 2022). *Atlas esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas*. Obtenido de https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjA1ZjQwZWUtYmRkYS00YjM0LWFhMjItMTMyOTQ0NDljNGQyIiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTgxMGItNDY5YS04YjRkLTY2N2ZjZDFiYWY4OCJ9

Cheng, L., Wei-Ping, C., & Ru-Huang, L. (2006). *Estimation of groundwater recharge using water balance coupled with base-flow-record estimation and stable-base-flow analysis.* Taipei: Environ Geo.

CONAMA. (2008). *Resolução CONAMA nº 396, 2008.* Conselho Nacional do Meio Ambiente.

CORPOAMAZONIA. (2006). *Plan de Ordenación y Manejo de la Microcuenca de la Quebrada Yahuarcaca. Leticia-Colombia.* Leticia.

CORPOAMAZONIA. (2008). *Concepto técnico No. 054-2008.* Leticia.

CORPOAMAZONIA. (2013). *Concepto técnico N° 200 - 2013. Concepto técnico de seguimineto y monitoreo licencia ambiental y permisos ambientales.* Leticia.

COSAMA. (01 de 02 de 2019). *Vistoria nas sedes da Cosama no interior revela cenário de abandono e caos*. Obtenido de http://www.cosama.am.gov.br/vistoria-nas-sedes-da-cosama-no-interior-revela-cenario-de-abandono-e-caos/

COSAMA. (2022). *Respuesta al proceso n° 01.05.025501.005574/2022-72 del 05/12/2022.* Companhia de Saneamento Básico do Amazonas.

CPRM. (2006). *Geologia e recursos minerais do Estado do Amazonas. Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado do amazonas. Escala 1:1.000.000.* Manaus: Convênio CPRM / CIAMA-AM.

CPRM. (11 de 2010). *Serviço Geológico do Brasil.* Obtenido de Pesquisa Geral: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php

Cuadrado, L. N., & Puentes, L. (2011). *Establecimiento de la línea base ambiental a partir de la generación de energía eléctrica en el municipio de Leticia en el departamento del Amazonas.*

Custodio, E., & Llamas, M. (1975). *Hidrología Subterránea.* Barcelona: Editorial Omega, 2 vol.

da Costa, H. M., Vieira, M., & Gomes, A. (2009). Identificão e análise dos principais impactos ambientais provocados por olarias no município de Tabatinga - Amazonas. *Caminhos de Geografia*, p. 71 - 75.

DANE. (1973). *Censo Nacional de Población y Vivienda 1973.*

DANE. (1985). *Censo Nacional de Población y Vivienda 1985.*

DANE. (1993). *Censo Nacional de Población y Vivienda 1993.*

DANE. (2005). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2005.*

DANE. (2018a). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 - Infografía Leticia.*

DANE. (2018b). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018.*

De Abreu, F. d., Cavalcante, I. N., & Matta, M. A. (2013). O Sistema Aqüífero Grande Amazônia–Saga: Um Imenso Potencial De Água Subterrânea No Brasil. *Águas Subterrâneas*.

Deng, X., Li, Y., Fan, X., Zhu, M., Tu, Y., Qin, L., . . . Liu, G. (2022). Risk assessment of sources of groundwater pollution, groundwater vulnerability, and groundwater value: A case study in the plain area of Northeast Beijing.

Dias, C. L., Barbour, E. D., Modesto, R. P., & Casarini, D. C. (2008). Importância do Monitoramento das Águas Subterrâneas na Gestão dos Recursos Hídricos. Natal: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

EUROPEAN COMMISSION. (2004). Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Groundwater Monitoring. *Technical report on groundwater monitoring as discussed at the workshop of 25th June 2004.* .

Ferreira Galvão, P. H., Alves Demétrio, J. G., Souza, E. L., Silva Pinheiro, C., & Martin Baessa, M. P. (2012). Hidrogeologia e geometria dos aquíferos das formações cretáceas Içá e e Solimões, Bacia Paleozoica do Solimões, na região de Urucu, Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, 42(1), 143.

Ferreira, A. N., Lima, C. F., Cardoso, F. B., Oliveira Junior, H. J., & Kettelhut, J. T. (2006). Panorama da gestão de aquíferos transfronteiriços – enfoque nas regiões centro-oeste e norte do Brasil. *VIII Congresso Latino americano de Hidrologia Subterrânea e Expo Água.*

Fiduciaria Petrolera - Consorcio RS-06. (2007). *Formulación de estudio de impacto ambiental y diseños definitivos para la construcción y operación del relleno sanitario del municipio de Leticia, departamento del Amazonas* . Leticia.

Fitts, C. R. (2002). *Groundwater Sciece.* Academic Press.

Foster, S., & Hirata, R. (1988). *Groundwater pollution risk assessment; a methodology using available data. In Groundwater pollution risk assessment; a methodology using available data.* Lima, Perú: WHo-PaHo/HPECEPIS Technical Manual.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies.* Washington D.C.: The World Bank.

Freeze, R. A., & Cherry , J. A. (1979). *Groundwater.*

García-González, M., Cruz-Guevara, L. E., & Mier-Umaña, R. (2013). Prospectividad de hidrocarburos en la cuenca Vaupés-Amazonas, Colombia. *Boletín de geología*.

García-Romo, C. F. (2008). *Modelo hidrogeológico conceptual del área urbana, suburbana y de expansión urbana del Municipio de Leticia, Departamento del Amazonas.* Manizales.

Gugulothu, S., Subbarao, N., Das, R., & Dhakate, R. (2022). Geochemical evaluation of groundwater and suitability of groundwater quality for irrigation purpose in an agricultural region of South India. *Applied Water Science*, 12(6), 142.

Huguett, A., Galvis, J., & Ruge, P. (1979). La Amazonía Colombiana y sus recursos - Proyecto Radargramétrico del Amazonas. *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*, 33-79.

IBAMA. (2017). *Ficha de Caracterização de Atividade - FCA - UTE Belém do Solimões.*

IBGE. (1991). *Censo Demográfico 1991.*

IBGE. (2000). *Censo Demográfico 2000.*

IBGE. (2008). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico .*

IBGE. (2010). *Censo Demográfico 2010.*

IBGE. (2017). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - Tabatinga, AM.*

IBGE. (2022). Obtenido de Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - Abastecimento de água e Esgotamento sanitário: https://cidades.ibge.gov.br/

IBGE. (18 de Julio de 2022). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Obtenido de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: https://www.ibge.gov.br/

IDEAM - INVEMAR. (2021). *Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua.* Bogotá D.C.

IDEAM. (2002). *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas.* Bogota D.C: Guias y procedimientos.

IDEAM. (2013). *Aguas subterráneas en Colombia: una visión general.* Bogotá.

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014.* Bogotá D.C.

IDEAM, INGEOMINAS, & MAVDT. (2009). *Intructivo para diligenciar FUNIAS.* Bogotá.

INGEOMINAS. (2000). *Inventario minero nacional. Departamento del Amazonas Escala 1:500.000.* Bogotá.

INGEOMINAS. (2010). *Memoria técnica Plancha 5-26. Mapa de permeabilidades de Colombia en escala 1:500.000.* Bogotá.

Instituto Água e Saneamento. (11 de 2022). *Municípios e Saneamento*. Obtenido de Mamejo de resíduos sólidos urbanos: https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/am/tabatinga

Jaramillo, A., Parra, L. N., & Rangel-Ch, O. (2011a). El registro de los cambios de clima en la estretigrafía de la amazonía colombiana I. Neógeno - inicio del cuaternario. *Paleoecología*, 34.

Jaramillo, A., Parra, L. N., & Rangel-Ch, O. (2011b). *Valoración integral del flujo histórico y actual de carbono en el sistema de inundación Yahuarcaca (Amazonía colombiana): su importancia en el cambio de clima global. A) La geología del trapecio Amazónico colombiano.* Proyecto Bicentenario.

Malagón, J. p. (2017). *Análisis Hidrogeoquímico Multivariado del Agua Subterránea del Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena – Colombia.* Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/58121/1/1019028622.2017.pdf

Martinez, N. O. (2004). Monitoreo de aguas subterráneas. *IDEAM -Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*.

MAVDT. (2009). *Resolución 2320 de 2009. Por la cual se modifica parcialmente la Resolución número 1096 de 2000 que adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico –RAS–.* Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

MAVDT. (2010). *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos.* Medellín: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Maxar. (2018-2022). *Esri World Imagery Map*. Obtenido de Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community: http://goto.arcgisonline.com/maps/World_Imagery

MINDESA. (2000). *Reglamento Técnico Del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS 2000. Sección II. Título C: Sistemas de potabilización.* Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico.

Ministério da Saúde. (2021). *Portaria GM/MS N°888, de 4 de Maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.*

MPS & MAVDT. (2007). *Resolución 2115 de 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.* Bogotá.

Muniz, D. P. (2018). La importancia del saneamiento básico para la salud pública: un estudio en el Municipio. *Espíritu Emprendedor TES*, 84–93.

MVCT. (2017). *Resolución 0330 de 2017. Por el cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS.* Bogotá.

OTCA & SHI SAS. (2015). *Informe final de la consultoría "Evaluación Evaluación de los sistemas acuíferos de la región de Leticia-Colombia" elaborado para el Proyecto GEF Amazonas por Servicios Hidrogeológicos Integrales (SHI S.A.S) Octubre,2015.* Medellín.

Pereira, L. d., & Cajazeiras, C. C. (2012). Caracterização dos principais aquíferos da região Sudoesteda Amazônia Ocidental.

Pineda , A. J. (2009). *Elaboración de estudios y diseños para la formulación del plan de saneamiento y manejo de vertimientos y el plan maestro de alcantarillado del municipio de Leticia, departamento del Amazonas.* Leticia: Alcaldía de Leticia .

Prefeitura de Tabatinga. (2018). *Plano municipal de saneamento e de gestão integrada de resíduos sólidos do município de Tabatinga.* Tabatinga, AM.

Prefeitura Municipal de Tabatinga. (08 de 07 de 2022). *Prefeitura Municipal de Tabatinga*. Obtenido de Prefeitura Municipal de Tabatinga: https://tabatinga.am.gov.br

Republica de Colombia. (2015). *Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.* Bogota D.C: Versión integrada con sus modificaciones.

Rodrigues, A. (2016). *Características físico-químicas das argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha no município de Tabatinga-AM: um estudo de caso em indústrias do municipio.* Belém-PA.

Rutledge, A. T. (1998). *Computer Programs for Describing the Recession of Ground-Water Discharge and for Estimating Mean Ground-Water Recharge and Discharge from Streamflow Records — Update.* Reston: USGS.

SEMA. (2019). *Plano estadual de recursos hídricos do amazonas (PERH/AM): Relatório Técnico RT 03 - Diagnóstico, prognóstico e cenários futuros dos recursos hídricos do estado.*

SGC. (2011). *Geología de las planchas 567, 568, 568 BIS, 569 y 569 BIS, escala 1:200.000.* Bogotá.

Souza, E. L., Ferreira, P. H., da Silva Pinheiro, C. S., Martins Baessa, M. P., Alves Demétrio, J. G., & Rodrigues Brito, W. R. (2013). Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão. *Geologia USP*.

SUI. (2003). *Reporte Consumos y suscriptores - Empresa de obras sanitarias de Leticia E.S.P. "En liquidación".*

SUI. (2004). *Reporte Consumos y suscriptores - Empresa de obras sanitarias de Leticia E.S.P. "En liquidación".*

SUI. (2005). *Reporte Consumos y suscriptores - Empresa de obras sanitarias de Leticia E.S.P. "En liquidación"*.

SUI. (2006). *Reporte Consumos y suscriptores - Empresa de obras sanitarias de Leticia E.S.P. "En liquidación"*.

SUI. (2008). *Reporte Consumos y suscriptores - Empresa de obras sanitarias de Leticia E.S.P. "En liquidación"*.

Uli, H., Geer, F. C., Geherels, J. C., & Kloosterman, F. H. (1999). State of the art on monitoring and assessment of groundwaters. *UN/ECE Task Force on Monitoring and Assessemt. Working Programme 1996/1999. Volume 4. The Netherlands Institute of Applird Geoscience: Lelystad*, Vol 4, 84 p.

UNECE. (2006). *Strategies for Monitoring and Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters.* United Nations.

UNESCO & OEA. (2007). *Sistemas Acuíferos Transfronterizos de las Américas. Evaluación preliminar.* Montevideo/Washington DC.

USPDL. (2022). *Respuesta a los radicados R-0783 del 5 de octubre de 2022 y R-5262 del 12 de octubre de 2022.* Unidad de Servicios Públicos Domiciliarios de Leticia.

Valenzuela, G., Guzmán, A., Zavala, B., Rosas, M., Núñez, S., De la Cruz, O., . . . Aldana, M. (1999). *Geología de los cuadrángulos de Punchana, Remanso, San Martín de Soledad, Quebrada Esperanza, Río Yahuillo, Quebrada Lupuna, Río Yaguas, Primavera, Pebas, Río Atacuari, Río Cotuhé, Quebrada Chontadero, San Francisco, Chambira, Caballococha, ...* Lima: INGEMMET.

Vélez, M., & Bastidas, B. (2018). Cuantificación de la recarga de aguas subterráneas en un acuifero trasfronterizo en la cuenca Amazónica. *Conference papper-Reserchgate*.

Zhang, J., Zhai, Y., Xue, P., Huan, H., Zhao , X., Teng, Y., & Wang, J. (2017). A GIS-based LVF model for semi-quantitative assessment of groundwater pollution risk: A case study in Shenyang, NE China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(2), 276-298.

Zwahlen, F. (2003). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers (COST action 620).* Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.