

ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2022

RESUMEN EJECUTIVO



IDEAM

Instituto de Hidrología,
Meteorología y
Estudios Ambientales

ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2022

RESUMEN EJECUTIVO

GUSTAVO FRANCISCO PETRO URREGO

Presidente de Colombia

FRANCIA MÁRQUEZ

Vicepresidenta de Colombia

MARÍA SUSANA MUHAMAD GONZÁLEZ

Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

MAURICIO CABRERA LEAL

Viceministro de Políticas y Normalización Ambiental

LILIA TATIANA ROA AVENDAÑO

Viceministra de Ordenamiento Ambiental del Territorio

Consejo Directivo

MARÍA SUSANA MUHAMAD GONZÁLEZ

Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

LILIA TATIANA ROA AVENDAÑO

Viceministra de Ordenamiento Ambiental del Territorio

FERNEY CAMACHO

Director de Infraestructura - Ministerio de Transporte

PAOLA RICAURTE AYALA

Asesora de la Dirección de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Departamento Nacional de Planeación (DNP)

ELKIN ERNESTO RAMÍREZ NIÑO

Director técnico de la Dirección Técnica Geoestadística - Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)

LUIS ENRIQUE RAMÍREZ ARCHILA

Director general (e) - Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam

GHISLIANE ECHEVERRY PRIETO

Directora general

JUAN FERNANDO ACOSTA MIRKOW

Secretario general

FABIO ANDRÉS BERNAL QUIROGA

Subdirector de Hidrología

ELIZABETH PATIÑO CORREA

Subdirectora de Estudios Ambientales

LINA MARÍA CABALLERO VILLALOBOS

Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

TC. JORGE GIOVANNI JIMÉNEZ SÁNCHEZ

Subdirector de Meteorología

ÍNGRID TATIANA SIERRA GIRALDO

Jefe de Oficina del Servicio de Pronóstico y Alertas

CÉSAR AUGUSTO SÁNCHEZ WALDRON

Jefe de Oficina Asesora de Planeación

JUAN DAVID GARCÍA CASTAÑO

Jefe de Oficina de Informática

GILBERTO ANTONIO RAMOS SUÁREZ

Jefe de Oficina Asesora Jurídica

MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO

Jefe de Oficina de Control Interno

MIGUEL ÁNGEL AYALA TOVAR

Coordinador del Grupo de Comunicaciones y Prensa

© Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

Producción editorial

Edición

Martha García Herrán

Nelson Omar Vargas Martínez

Coordinación técnica

Martha García Herrán

Nelson Omar Vargas Martínez

Coordinación editorial

Catalina Herrera Barrientos

María Teresa Sánchez García

John Álvarez Restrepo

**Centro de Ciencia y Tecnología de
Antioquia - CTA**

Andrés Felipe Tapiero Ríos

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios
Ambientales - Ideam**

Edición cartográfica

Luisa Fernanda Cruz Cárdenas

Foto de portada

Pexels: <https://www.pexels.com/photo/waterfalls-in-forest-460621/>

Corrección de estilo

Margarita Mejía Umaña

María Fernanda Monsalve

**Dirección de arte, diseño editorial, graficación y
diagramación**

Andrés Felipe León Rodríguez

Impresión

Multiservicios JM

ISBN: 978-958-5489-12-7

Cítese como: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam (2023). Resumen Estudio Nacional del Agua 2022. Ideam.

**Publicación aprobada por el Instituto de
Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
- Ideam**

Febrero de 2024, Bogotá, D. C., Colombia

Distribución gratuita

Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

Autores

Nelson Omar Vargas Martínez

Martha García Herrán

Fabio Andrés Bernal Quiroga

María Costanza Rosero Mesa

Carolina Vega Viviescas

Jorge Andrés González Rojas

Carlos Albeiro Figueroa Ortiz

Jorge Luis Ceballos Liévano

Emilio Andrés Gómez García

Sandra Patricia Salamanca Jiménez

Luis Eduardo Toro Espitia

Diego Arévalo Uribe

Consuelo Helena Onofre Encinales

Claudia Nicol Tetay Botía

Juan Esteban González Valencia

Omayda Cárdenas Bustamante

Jenny Paola Marín Salazar

Juan Gabriel Osorio Osuna

José Ville Triana

Julián David Urrea

Nelsy Verdugo Rodríguez

Yina Paola Nocua Ruge

Juan José Montoya Monsalve

Claudia Yaneth Contreras Trujillo

Gabriela Parada Puig

Carolina María Rodríguez Ortiz

Juan Fernando Figueroa Alzate

Yazari Agudelo Cano

Diana Patricia Díaz Jiménez

Gerardo Nava Tovar

Carlos Andrés Castañeda Orjuela

Beatriz Hernández Castillo

Lina Johanna Garzón Riveros

Julián Albeiro García Gómez (pasante UNAL)

Brayan Steven Benavides Bello (pasante UNAL)

Tabla de Contenido

Introducción	10
1. ¿Qué es el Estudio Nacional del Agua?	10
2. ¿Cómo se construye el ENA 2022?	10
3. ¿Qué innovaciones trae el ENA 2022?	12
4. ¿Dónde ocurre y cómo varía la disponibilidad del agua en Colombia?	12
4.1 Hidrografía y zonificación	12
4.2 Oferta hídrica superficial natural	16
4.3 Eventos de sequía en Colombia	23
4.4 Dinámica de las inundaciones y características de cuerpos de agua lénticos	27
4.5 Evolución y dinámica de los glaciares y su relación con la alta montaña	34
4.6 Estado del conocimiento de las aguas subterráneas	38
5. ¿Cuál es el comportamiento de los sedimentos en Colombia?	47
6. ¿Cuál es la importancia de la hidrología isotópica en Colombia?	54
7. ¿De qué modo el hombre presiona y afecta el agua y los sistemas hídricos por uso y contaminación?	61
7.1 Usos del agua	62
7.2 Calidad del agua	76
8. ¿En qué municipios hay susceptibilidad al desabastecimiento hídrico en temporada seca y de lluvia?	88
9. ¿Cuáles son las cuencas (subzonas hidrográficas) con problemas del agua en Colombia?	96
10. Consideraciones sobre la evaluación nacional del agua en Colombia	104
Referencias bibliográficas	107

Lista de figuras

Figura 1. Sistema de indicadores hídricos para la evaluación del agua, ENA 2022.	11
Figura 2. Zonificación hidrográfica e hidrogeológica de Colombia.	13
Figura 3. Subzonas hidrográficas y acuíferos transfronterizos.	15
Figura 4. Balance hídrico nacional.	16
Figura 5. Distribución del índice de regulación hídrica a nivel de área hidrográfica.	17
Figura 6. Escorrentía anual (izq.) y mensual (der.) multianual de año medio.	19
Figura 7. Mapas nacionales de escorrentía anual multianual de año seco (izq.) y año húmedo (der.).	20
Figura 8. Mapas nacionales de escorrentía mensual multianual de año seco (izq.) y año húmedo (der.).	21
Figura 9. Escorrentías medias anuales por área hidrográfica para el periodo 1982-2021, resultantes del modelo DWB.	22
Figura 10. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en algunas zonas de las cinco áreas hidrográficas.	23
Figura 11. Metodología para generación de índices de sequía.	24
Figura 12. Evolución espaciotemporal del índice multivariado (IEMS) precipitación-humedad del suelo-escorrentía entre mayo de 2016 y julio de 2017, para un periodo de agregación de 24 meses.	26
Figura 13. Índice integrado de sequías multivariado por zonas hidrográficas y departamentos agregación tres meses.	27
Figura 14. Metodología para la definición de ZPI y cuerpos de agua.	28
Figura 15. Metodología para la definición de áreas o zonas intervenidas por actividad antrópica dentro de las ZPI.	29
Figura 16. Zonas potencialmente inundables naturales o seminaturales e intervenidas por actividad antrópica.	30
Figura 17. Número de eventos de inundación (izq.) entre 2000 y 2021, y de avenidas torrenciales (der.) 2015-2021, a nivel nacional.	31
Figura 18. Evolución de la cobertura glaciar en Colombia en las últimas seis décadas.	35
Figura 19. Balances de masa multianual del glaciar Santa Isabel, sector Conejeras (izq.) y de la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán, sector Ritacuba Blanco (der.).	36
Figura 20. Rendimiento hídrico medio mensual (Q) para días con temperatura inferior a 2 °C (azul) y días con temperatura superior a 2 °C (rojo). Indicación del evento El Niño 2015-2016 (sombreado gris), punto de quiebre en evolución de la producción de agua (línea discontinua) y precipitación mensual (barras azules).	37
Figura 21. Caudal promedio en los ecosistemas de alta montaña. Casos cuenca Río Claro (izq.), río Cardenillo, Güicán de la Sierra, Boyacá (der.). El caudal de cada ecosistema incluye el (los) del ecosistema inmediatamente superior.	37
Figura 22. Cantidad de puntos monitoreados por la autoridad ambiental.	39
Figura 23. Mapa de puntos de redes de monitoreo de aguas subterráneas por autoridades ambientales.	41
Figura 24. Resultados de clasificación por tipo de puntos de agua subterránea.	42
Figura 25. Volúmenes captados en m³ por autoridades ambientales en el periodo 2016-2021.	43
Figura 26. Mapa de los sistemas acuíferos de Colombia, 2022.	46
Figura 27. Esquema marco metodológico y conceptual.	47
Figura 28. Mapas mensuales de erosión hídrica potenciales agregados por subzona hidrográfica.	49

Figura 29. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial (izq.) y número de subzonas según categoría de erosión hídrica potencial por área hidrográfica (der.).	50
Figura 30. Mapa de erosión hídrica potencial en ladera agregado por subzonas hidrográficas (izq.) y número de subzonas según categoría por área hidrográfica (der.).	51
Figura 31. Distribución por categorías del rendimiento de sedimentos de las cuencas aferentes a las estaciones (izq.) y estimaciones a partir de balance de largo plazo (der.).	52
Figura 32. Localización proyectos de hidrología isotópica y estaciones de las redes RNI y GNIP.	57
Figura 33. Localización puntos de observación con datos de agua lluvia.	58
Figura 34. Variación mensual del oxígeno-18 y precipitación, varias estaciones.	60
Figura 35. Variación temporal del oxígeno-18 en cuatro estaciones, en el periodo junio de 2019 a marzo de 2020.	61
Figura 36. Uso del agua azul multisectorial 2008-2020 (demanda hídrica y huella hídrica azul).	63
Figura 37. Uso del agua verde agrícola y pecuaria, 2008-2020 (huella hídrica verde).	64
Figura 38. Demanda hídrica por sectores económicos, 2020.	65
Figura 39. Comparación de la participación sectorial en la demanda hídrica total, 2008-2020.	65
Figura 40. Áreas hidrográficas: demanda de agua y huella hídrica azul.	66
Figura 41. Participación sectorial en la demanda hídrica por área hidrográfica.	67
Figura 42. Participación en la demanda hídrica por subzona hidrográfica, 2020.	67
Figura 43. Participación porcentual en la huella hídrica azul total por subzona hidrográfica, 2020.	68
Figura 44. Composición sectorial de la demanda hídrica en las 20 subzonas con mayor participación porcentual con relación al total nacional.	69
Figura 45. Demanda hídrica en Colombia, 2020.	70
Figura 46. Composición sectorial de la demanda hídrica por departamento.	71
Figura 47. Índice de uso de agua para condiciones hidrológicas promedio y extremas de año seco.	72
Figura 48. Distribución porcentual de estado de IUA por SZH en Colombia, año medio (izq.) y año seco (der.).	73
Figura 49. Índice de presión hídrica a los ecosistemas.	75
Figura 50. Distribución por cultivo y destino de flujos de agua virtual total en Colombia, 2020.	76
Figura 51. Variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir de concentración de carbono orgánico total, oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal y sólidos totales.	78
Figura 52. Concentración mercurio total en sedimentos.	79
Figura 53. Índice de calidad del agua, 2021.	80
Figura 54. Carga contaminante potencialmente vertida a las corrientes hídricas (t/año) 2020.	81
Figura 55. Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL) año medio y seco, 2022.	83
Figura 56. Comparación de sustancias químicas empleadas en la transformación de la coca en Colombia.	85
Figura 57. Municipios con reporte de uso de plaguicidas, Colombia, 2017-2021.	86
Figura 58. Departamentos con afectación en sus sistemas de abastecimiento a causa de temporadas secas. Período 2017-2021.	90
Figura 59. Análisis de los municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. Período 2017-2021.	91
Figura 60. Distribución de los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Período 2017-2021.	92

Figura 61. Eventos asociados con lluvia que ocasionaron afectaciones en el abastecimiento de los 254 municipios susceptibles.	93
Figura 62. Erosión hídrica potencial en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia.	94
Figura 63. Dominios temáticos, componentes e indicadores del análisis integrado del agua.	97
Figura 64. Evaluación integrada del agua por subzona hidrográfica.	99

Lista de tablas

Tabla 1. Caudales medios anuales de algunos de los ríos más largos y caudalosos de Colombia.	13
Tabla 2. Variables medias multianuales de oferta hídrica por área hidrográfica para el periodo 1991-2020.	18
Tabla 3. Oferta hídrica disponible de año medio por área hidrográfica para el periodo 1991-2020.	21
Tabla 4. Eventos de sequía identificados a nivel nacional.	24
Tabla 5. Áreas de zonas potencialmente inundables naturales y transformadas.	29
Tabla 6. Mapas de inundación generados por el Ideam entre 2018 y 2021 a escala 1:2000.	32
Tabla 7. Distribución de cuerpos de agua lénticos por área hidrográfica.	33
Tabla 8. Estudios realizados sobre cuerpos lénticos a nivel local.	34
Tabla 9. Parámetros de calidad monitoreados por las autoridades ambientales.	40
Tabla 10. Volúmenes concesionados y captados (2016-2021).	43
Tabla 11. Volumen (m ³) concesionado por usos (2016-2021).	44
Tabla 12. Volumen (m ³) captado por usos (2016-2021).	44
Tabla 13. Fichas de sistemas acuíferos actualizadas.	45
Tabla 14. Proyectos de hidrología isotópica (búsqueda no exhaustiva).	55
Tabla 15. Índice de uso de agua: subzonas por categoría y área hidrográfica.	73
Tabla 16. Índice de presión hídrica sobre los ecosistemas, subzonas por categoría y área hidrográfica.	74
Tabla 17. Carga contaminante generada por los sectores usuarios y removida en sistemas de tratamiento de aguas residuales, 2020.	82
Tabla 18. Porcentajes de remoción de carga contaminante a nivel nacional, sectores industrial y doméstico, 2020.	82
Tabla 19. Reporte de agroquímicos expresados en toneladas para los ENA 2010, 2014 y 2018, y para el año 2020.	84
Tabla 20. Reporte de agroquímicos expresados en litros para los ENA 2010, 2014, 2018, y para el año 2020.	84
Tabla 21. Municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca con alta recurrencia y área de afectación urbana y rural.	89
Tabla 22. Municipios susceptibles al desabastecimiento tanto en temporada seca como en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021.	94
Tabla 23. Análisis integrado, subzonas por área hidrográfica y categoría de análisis.	100
Tabla 24. Subzonas hidrográficas en categoría “muy alta” en condiciones hidrológicas extremas de año seco.	100
Tabla 25. Subzonas hidrográficas en categoría “alta” en condiciones hidrológicas extremas de año seco.	101

Introducción

El Estudio Nacional del Agua 2022 permite reconocer las condiciones de ocurrencia y distribución de las diferentes masas de agua que constituyen el patrimonio hídrico del país: aguas superficiales que corren por cauces o que se almacenan en lagos, lagunas, humedales y glaciares; aguas subterráneas que se almacenan y discurren por el subsuelo; y agua atmosférica que circula en forma de vapor para, finalmente, constituir masa precipitable que alimenta las anteriores manifestaciones hídricas o se evapora muchas veces después de haber contribuido a sostener la diversidad vegetal. Pero, además, da cuenta de las presiones por uso y afectaciones antrópicas o propias de la variabilidad y el cambio climático. La comprensión de estas ocurrencias y procesos, así como su comportamiento temporal, equivale a entender a profundidad el ciclo hidrológico de las unidades de análisis hidrográfico (áreas, zonas y subzonas).

La información generada —oferta hídrica, calidad del agua, dinámicas de uso, riesgos asociados a condiciones extremas, dinámica de sedimentos, vulnerabilidad para el abastecimiento de poblaciones, afectaciones a los regímenes hidrológicos e hidrogeológicos por presiones de uso o alteraciones climáticas— se constituye en el insumo esencial para una adecuada toma de decisiones; permite una planificación sostenible para preservar tanto la buena calidad de vida de los humanos como la salud de los ecosistemas, con el fin de garantizar seguridad alimentaria, seguridad energética y abastecimiento, lo mismo que seguridad hídrica para la preservación y recuperación de la biodiversidad.

Las oportunidades de nuevo conocimiento que brinda cada actualización del ENA deben ser reconocidas para definir las fronteras y dominios de un verdadero ordenamiento territorial alrededor del agua que redunde en equidad para el acceso al agua y el uso adecuado de los recursos naturales.

Estas consideraciones iniciales justifican este resumen ejecutivo para extender la difusión de información y conocimiento para la gestión integral de sistemas hídricos, y una toma de decisiones acertada para escenarios futuros que se expresen en instrumentos de política y herramientas técnicas de soporte a la toma de decisiones.

1. ¿Qué es el Estudio Nacional del Agua?

El Estudio Nacional del Agua representa la síntesis de la evaluación del agua que realiza el Ideam desde su misionalidad de manera continua, y que se concreta cada cuatro años en estos estudios. La versión 2022 se aborda —como en las evaluaciones anteriores, del ENA 1998 al ENA 2018— desde el concepto de integralidad y enfoque sistémico de los ciclos y procesos de la naturaleza; y reconoce el agua como elemento vital, estructurante del medio natural y decisivo en la dinámica de los procesos sociales y productivos (Ideam, 2010).

Estos estudios, publicados por el Ideam de forma sistemática desde 1998, presentan información de utilidad para entidades territoriales y ambientales, sectores económicos, instituciones académicas, centros de investigación, organizaciones no gubernamentales, organizaciones sociales y comunidad en general.

El ENA tiene como propósito efectuar un seguimiento del estado, dinámica y presiones por uso y contaminación del agua, además de identificar escenarios futuros que orienten la toma de decisiones estratégicas basadas en información y conocimiento. De igual manera, sirve de referente para la evaluación regional, local y sectorial del agua.

2. ¿Cómo se construye el ENA 2022?

El ENA es un documento de construcción interdisciplinaria e interinstitucional, es sistemático y está soportado en información oficial de generadores de información de diferentes dependencias misionales del Ideam y de cerca de 50 colaboradores, instituciones públicas y privadas, asociaciones gremiales, centros de investigación y universidades. Los desarrollos temáticos son responsabilidad de 30 expertos nacionales de diferentes especialidades disciplinares, y cuentan con una coordinación técnica compartida entre un consultor de alto nivel y la Subdirección de Hidrología del Ideam.

El marco conceptual del ENA es el ciclo hidrológico con todas sus fases, procesos e interacciones; estos se analizan desde las diferentes temáticas

Para este ENA se conserva el esquema de indicadores definido para hacer seguimiento a las condiciones hídricas. Este se compone de dos grandes grupos: los indicadores que dan cuenta

Según su pertinencia, algunos de estos indicadores se estiman y espacializan para condiciones de año seco, año medio y año húmedo.



3. ¿Qué innovaciones trae el ENA 2022?

Con respecto al ENA anterior (2018), muchos de los componentes tienen una mayor resolución espacial y temporal, y mayor cobertura temática. Cuenta con avances importantes hacia la automatización; incluye temas nuevos y se realizan análisis de tendencias comparando los resultados con los de los ENA 2010, 2014, 2018 y 2022 cuando las metodologías, las estadísticas y la información lo permiten.

Las temáticas nuevas están relacionadas con: hidrológica isotópica; índices multivariado de sequías; susceptibilidad al desabastecimiento hídrico municipal en temporada de lluvia; delimitación y características de cuencas y acuíferos como fuentes hídricas de abastecimiento para 72 municipios; y con aportes del Ideam y del ENA para los reportes de indicadores de Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial, para el ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento, en el marco de los compromisos que tiene el país.

Este Estudio incorpora ventanas regionales en temáticas de inundaciones, isotopía y calidad de agua. Presenta resultados de evaluación del agua en regiones específicas de especial relevancia, como la desarrollada para el Magdalena Medio, el río Bogotá y para cuerpos de agua lénticos como las ciénagas de Santa Marta, Zapatosa y Ayapel.

Adicionalmente, dados los avances en resolución espacial y temporal, se publican anexos digitales con información detallada de diferentes componentes que sirven como referente base para las evaluaciones regionales del agua, las evaluaciones sectoriales y para el uso de esta información por parte de la comunidad en general.

4. ¿Dónde ocurre y cómo varía la disponibilidad del agua en Colombia?

En este punto se abordan tanto el agua superficial como el agua subterránea. Se muestra una síntesis de la oferta hídrica superficial natural y disponible, su variabilidad, el análisis de eventos extremos de

sequías, las características de las zonas potencialmente inundables y los cuerpos de agua lénticos. De igual manera, se resume el estado actual del conocimiento de las aguas subterráneas en Colombia.

4.1 Hidrografía y zonificación

Gracias a la ubicación geográfica, la diversidad de relieve y la gran variedad de climas que posee, Colombia es uno de los países que cuenta con mayor riqueza hídrica en el mundo. La disponibilidad de agua en el país se ve reflejada en el sinnúmero de cursos de agua, cuerpos de agua lénticos y sistemas acuíferos con los que cuenta, los cuales se distribuyen por toda su superficie terrestre. Colombia se encuentra privilegiada al estar limitada por dos océanos, el Pacífico y el Atlántico; en el segundo, se delimita el mar Caribe (MAVDT, 2010).

La abundancia de Colombia también se refleja en que ocupa los primeros puestos entre los países con mayores fuentes hídricas en el mundo, con un valor de escurrimiento que equivale a un volumen de 1963 km³ de agua por año, valor que (en términos de rendimiento promedio) es de 56,2 l/s/km², mientras que el promedio mundial es de apenas 10 l/s/km², y el promedio latinoamericano es de 21 l/s/km² (Ideam, 2019).

El territorio se divide en áreas hidrográficas que corresponden a las vertientes o regiones hidrográficas que, en sentido estricto, son las grandes cuencas que agrupan un conjunto de ríos con sus afluentes que desembocan en un mismo mar. Estas áreas hidrográficas corresponden al área hidrográfica del Orinoco, área hidrográfica del Amazonas, área hidrográfica del Caribe, área hidrográfica del Pacífico y, adicionalmente, se delimita el área hidrográfica de la cuenca Magdalena-Cauca; aunque esta última tributa y forma parte de la vertiente Caribe, tiene importancia socioeconómica por su alto poblamiento y aporte al producto interno bruto (Figura 2). Las cinco áreas hidrográficas se dividen en 40 zonas y 316 subzonas hidrográficas (Ideam, 2013, modificado en 2022).

En la Tabla 1, se presentan los caudales de algunos de los ríos más largos y caudalosos de Colombia.

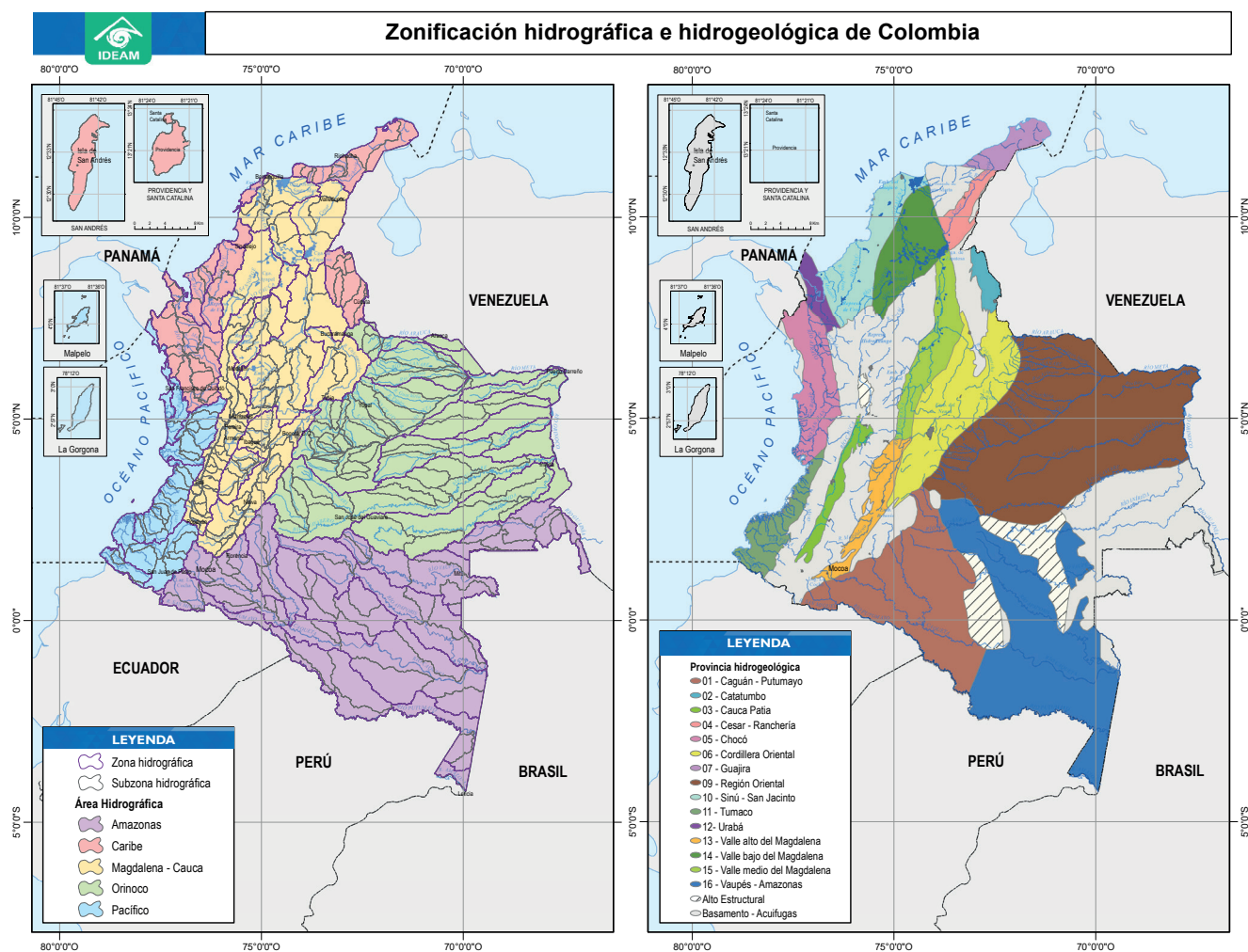


Figura 2. Zonificación hidrográfica e hidrogeológica de Colombia.

Tabla 1. Caudales medios anuales de algunos de los ríos más largos y caudalosos de Colombia.

Río	Longitud (km)	Caudal medio anual (m³/s)	Estación final - Ideam	Departamento	Municipio
Magdalena	1.540	8.058	Calamar [29037020]	Bolívar	Calamar
Amazonas	116	41.579	Nazareth [48017030]	Amazonas	Leticia
Cauca	1.350	2.448	Tres cruces [25027640]	Bolívar	Achí
Guaviare	947	7.389	Guayare [31097010]	Guainía	Inírida
Putumayo	1.717	7.588	Tarapacá [47107010]	Amazonas	Tarapacá
Caquetá	1.350	10.273	Bacuri [44187030]	Amazonas	La Pedrera

Río	Longitud (km)	Caudal medio anual (m³/s)	Estación final - Ideam	Departamento	Municipio
Atrato	750	2.550	Bellavista [11077010]	Chocó	Bojayá (Bellavista)
Vaupés	1.000	1.251	San Antonio [42077010]	Vaupés	Mitú
Meta	1.110	6.614	Aceitico [35257040]	Vichada	Puerto Carreño
San Juan	380	2.304	Penitas [54097010]	Chocó	El Litoral del San Juan (Docordó)
Patía	400	339	Los Nortes - Aut. [52077020]	Nariño	Cumbitara
Sinú	438	479	La Doctrina [13077040]	Córdoba	Lorica

Por otra parte, la riqueza hídrica del país se manifiesta también en los diferentes cuerpos de agua lénticos que albergan grandes cantidades de agua, tales como ciénagas, embalses, lagunas y pantanos. Se ha identificado que su área equivale a 831.163,7 ha; de estas, hay 397.613,7 ha que corresponden a ciénagas, 51.864,3 ha a embalses, 123.412 ha son lagunas y 258.273 ha están ocupadas por pantanos (Ideam, 2015).

Ahora bien, en cuanto a ciénagas, en Colombia existen alrededor de 1900 ciénagas que se encuentran distribuidas en tres regiones principales: el Bajo Magdalena (que alberga el 82 % de las ciénagas del país), el Bajo Atrato y las llanuras bajas del río Sinú (Rivera y Silva, 2015). En la cuenca baja del río Magdalena, en particular, se encuentran los grandes sistemas de ciénagas, entre los cuales se destaca la Ciénaga Grande de Santa Marta y la ciénaga de Zapatosa (Ideam, 2015).

Por otra parte, el país cuenta con alrededor de 32 grandes embalses, cuyos principales usos son: generación de energía eléctrica, abastecimiento de agua potable y riego (Romero V., 2020). Los principales embalses se encuentran en la cuenca alta del Magdalena (el embalse de Betania) y en la zona de Antioquia (embalse de Peñol-Guatapé), entre muchos otros (Ideam, 2015).

En el caso de Colombia, los lagos y lagunas de montaña pueden ser de origen glaciar, volcánico o tectónico y se encuentran en todos los pisos térmicos; sus características ambientales, ecológicas y paisajísticas están determinadas por la altura sobre el nivel del mar. Dentro de los lagos y lagunas de origen glaciar se destacan: la laguna de La Plaza y la laguna Grande de la Sierra, localizadas en el Parque Nacional Natural El Cocuy; la laguna Naboba, en la Sierra Nevada de Santa Marta; las lagunas del Complejo Chingaza, que surten de agua a Bogotá; la laguna de Iguaque, en Boyacá; la del Otún, en el Parque Nacional Natural Los Nevados; y la Laguna de Chisacá, en el páramo de Sumapaz, entre otras. De las de origen volcánico, encontramos la laguna Verde, en el volcán Azufral, y su homónima en el Parque Nacional Natural Los Nevados, las cuales ocupan cráteres de volcanes inactivos y reciben su nombre debido a la coloración verde de sus aguas. Y los lagos y lagunas de origen tectónico, que se localizan principalmente en los altiplanos; entre estos podemos destacar: el lago de Tota, con 5598 hectáreas, que es en la actualidad el de mayor extensión en Colombia; se localiza a 3015 m.s.n.m., en jurisdicción de los municipios de Aquitania, Cúitva, Sogamoso y Tota, en el departamento de Boyacá. Y el lago de La Cocha, con 4.200 hectáreas, el segundo en tamaño en Colombia, localizado a 2.700 m.s.n.m., al sur del país, en cercanías al Nudo de los Pastos, en Nariño (Rivera y Silva, 2015).

Cuencas hidrográficas y acuíferos transfronterizos

Colombia comparte cuencas transfronterizas en las áreas hidrográficas Caribe, Orinoco, Pacífico y Amazonas. Hay 23 zonas hidrográficas transfronterizas y cerca de 50 subzonas (Figura 3) en los departamentos de Nariño y Putumayo (con Ecuador), Amazonas (con Perú y Brasil), Vaupés (con Brasil), Guainía, Vichada, Arauca, Norte de Santander, Cesar y La Guajira (con Venezuela) y Chocó (con Panamá).

Tal como se observa, en el otro mapa de la misma Figura 3, Colombia comparte cinco sistemas acuíferos

feros: el llamado 1S Chocó-Darién, el 2S Táchira-Pamplonita, el 3S La Guajira, el 10S Tulcán-Ipiales y el 13S Amazonas. En territorio colombiano, están caracterizados los sistemas acuíferos de Táchira-Pamplonita y de La Guajira, y se tienen algunos conocimientos del sistema acuífero del Amazonas en Leticia (Unesco, 2017).

Balance hídrico nacional

En la Figura 4 se ilustra un *balance hídrico nacional* que da cuenta del patrimonio natural representado por las condiciones de precipitación, evapotranspiración y escorrentía, y el uso que hacemos para satisfacer las necesidades sectoriales, incluidos el consumo humano y el agua que exportamos.

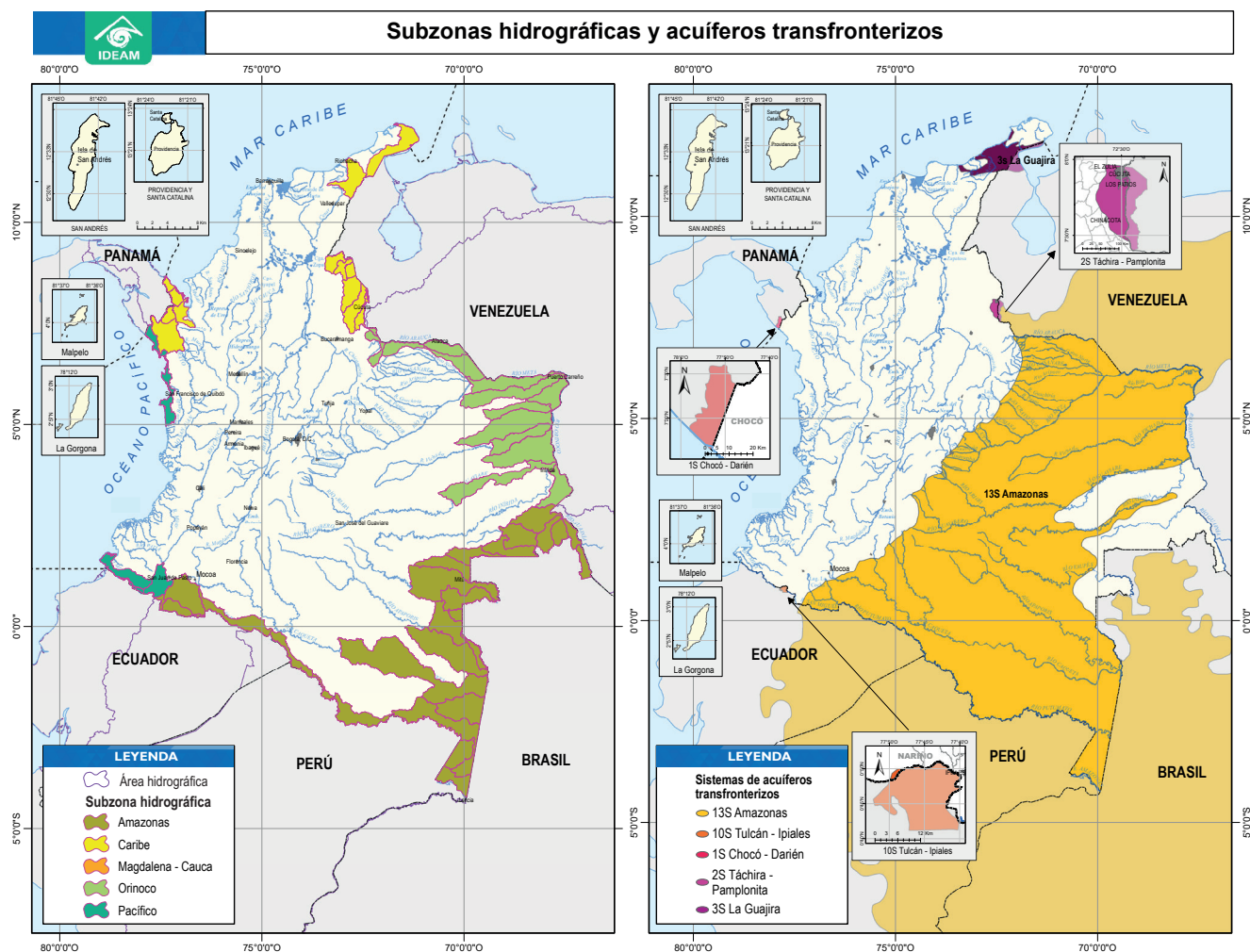


Figura 3. Subzonas hidrográficas y acuíferos transfronterizos.

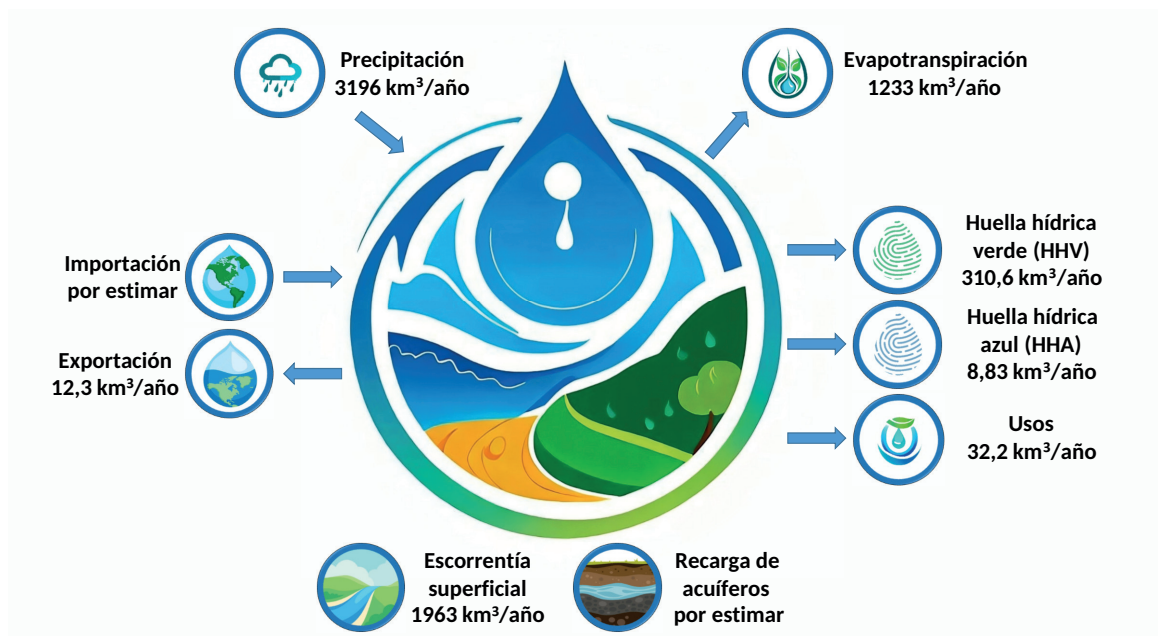


Figura 4. Balance hídrico nacional.

Es importante resaltar la huella hídrica verde asociada a la apropiación humana de esta agua (almacenada en el suelo), que permite una aproximación numérica a la competencia por el agua verde entre el sector agropecuario y los ecosistemas naturales. Por otro lado, la huella hídrica azul es la apropiación de agua azul (ríos, lagos, acuíferos) correspondiente a la extracción o retención de esta en una fuente superficial o subterránea que no retorna a la cuenca y, por lo tanto, no está disponible para ningún otro uso.

Aún quedan valores por definir para la recarga de acuíferos, y aunque se realizaron estimaciones de reservas de agua subterránea en el ENA 2010, aún es muy incipiente el conocimiento de los sistemas acuíferos para precisar con confiabilidad e incertidumbre razonable los valores de la recarga nacional. Los valores de recarga están determinados únicamente para los sistemas acuíferos con avances significativos del conocimiento de algo más del 15 % del potencial hidrogeológico nacional (Ideam, 2010).

Tampoco se tienen valores definidos para las importaciones de agua que corresponden al volumen de agua virtual asociada a la importación de bienes o servicios en el país o, dicho de otra manera, al volumen total de agua utilizada (en las áreas de exportación) para producir los productos que se importan.

4.2 Oferta hídrica superficial natural

La evaluación del agua superficial se realiza a través del análisis de los indicadores de aridez y regulación hídrica; de la cuantificación y distribución de la oferta hídrica natural; de los eventos de sequía que han sucedido en el país y sus regiones; de la dinámica de las inundaciones, y de la evolución y dinámica de los glaciares y su relación con la alta montaña.

La disponibilidad del agua superficial en el país, así como su variabilidad, está referida a las condiciones de los flujos y procesos del ciclo del agua. En el ENA 2022, se evalúan las características medias de la oferta hídrica superficial total, las condiciones extremas de año seco y húmedo, y el agua disponible que podría usarse sin afectar los ecosistemas y usuarios del recurso. Se analizan las condiciones de aridez y de regulación hídrica a través de indicadores del sistema hídrico natural, la variación de la disponibilidad de agua en el tiempo y los efectos hidrológicos de esta en las áreas, zonas y subzonas hidrográficas del país. Se evalúan las diferentes variables del ciclo hidrológico a resolución diaria.

Dentro del ciclo del agua, el volumen que se aprecia con más facilidad es aquel que escurre de forma superficial desembocando en ríos y arroyos deli-

mitados por las cuencas hidrográficas; esta cantidad es denominada *Oferta hídrica*. Esta variable es estimada con un balance hidrológico en varias escalas temporales: las características medias son evaluadas en la *Oferta hídrica total multianual de año medio*; y las condiciones extremas esperadas, con la *Oferta hídrica total multianual de año seco y húmedo*. Así mismo, se realiza un estimado de la *Oferta hídrica disponible multianual*, es decir, el agua que podríamos usar sin afectar los ecosistemas; y, por último, se evalúa la variación temporal de esta misma variable con la *Oferta hídrica total histórica*.

Los resultados del índice de aridez (IA) reafirman que el país cuenta con una gran riqueza hídrica, ya que cerca del 90 % del país se catalogan excedentes de agua entre moderados y altos. Sin embargo, se resalta el norte del país, desde los departamentos de Córdoba, Sucre y Norte de Santander hasta La Guajira, ya que —con excepción de la Sierra Nevada de Santa Marta— como la zona donde se concentran las áreas deficitarias en términos hídricos, lo que hace que esta región sea mucho más vulnerable a la degradación. Además, en la parte más alta de las cordilleras, alrededor de grandes ciudades como Medellín, Bucaramanga, Tunja, Bogotá, Neiva y Cali, se reconocen zonas con déficits en la categoría de moderado a deficitario.

Los resultados del índice de regulación hídrica (IRH) presentados son semejantes a los de la anterior versión del estudio. Concentran una alta regulación

en el 40,5 % del territorio nacional, específicamente en las regiones del Amazonas, Pacífico, Atrato y la cuenca baja del río Cauca que está regulada por un sistema de embalses y, en su encuentro con el río Magdalena, predominan los sistemas cenagosos que promueven una buena regulación. La gráfica de la Figura 5 muestra la distribución en porcentaje de las categorías del índice en las cinco áreas hidrográficas.

En contraste, las regulaciones moderadas se concentran en las cuencas del Orinoco, cuenca alta del río Cauca, cuenca media del río Magdalena y en el Catatumbo. Son de especial relevancia las cuencas de la Alta Guajira, los ríos Cesar, Tarazá, Seco, Sumapaz, Casanare, y las cuencas de la parte alta del río Meta (ríos Guamal-Humadea, Guatiquía, Guacavía, Humea, Guavio, Lengupá, Upía y Cusiana).

Oferta hídrica total superficial (OHTS)

El concepto de oferta hídrica puede ser multidimensional si solo aborda la condición natural hidrológica e hidrogeológica o si incluye análisis de calidad y su relación socioeconómica en la región de análisis. Este capítulo se centra en la estimación de la *Oferta hídrica total superficial (OHTS) natural*, es decir, sin influencia humana dentro del marco del ciclo natural del agua, representado matemáticamente por un balance hídrico cuyos principios básicos son los de conservación de masa y energía.

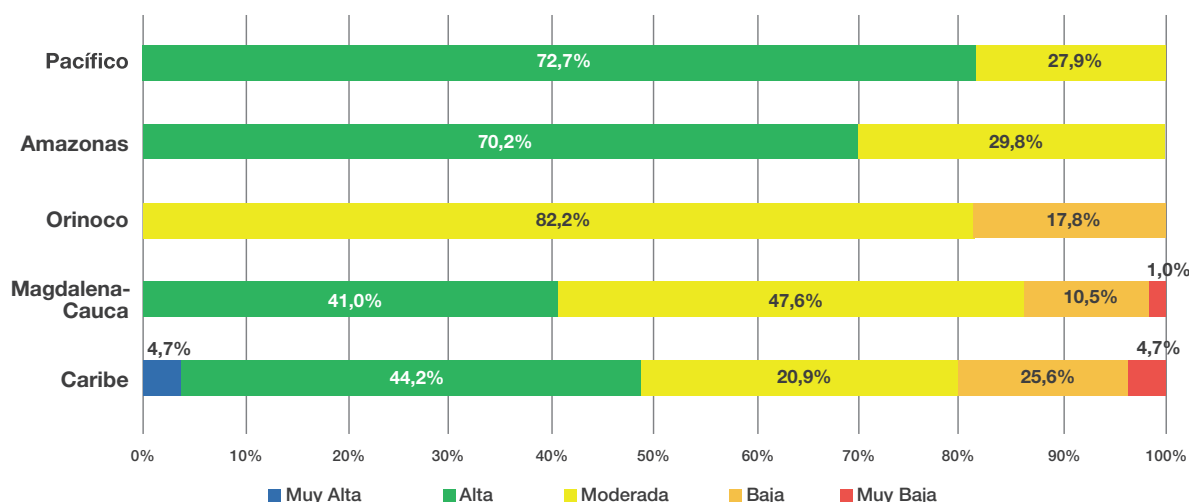


Figura 5. Distribución del índice de regulación hídrica a nivel de área hidrográfica.

La importancia de esta variable debe analizarse desde tres perspectivas: (1) espacial, dada su distribución heterogénea en el territorio nacional; (2) temporal, ya que, dadas las condiciones de variabilidad natural, no se dispone de la misma oferta todos los meses del año ni todos los años; y (3) en la escala de análisis, ya que los órdenes de magnitud y variabilidad pueden diferir dependiendo del tamaño de la cuenca analizada.

La OHTS multianual corresponde a un cálculo promedio o de largo plazo en una base anual, cuyo periodo de actualización corresponde a 1991-2020, coincidente con la actual normal climatológica definida por la OMM (Organización Meteorológica Mundial). Esta oferta se ha estimado en 1.963 km^3 , los cuales fluyen con un rendimiento hídrico de cerca de $54,7 \text{ l/s/km}^2$, equivalentes a una escurrentía promedio de 1721 m ; es decir, que cerca del $61,3 \%$ de la precipitación que cae en el país escurre superficialmente por laderas y planicies hasta su concentración final en pequeños cauces, canales y ríos.

En la Tabla 2, se presenta la distribución por área hidrográfica de las variables hidrológicas relacionadas con la OHTS multianual de año medio y, en general, el volumen de agua superficial que fluye durante un año en el territorio nacional.

La representación espacial de la escurrentía anual multianual de año medio se muestra en el mapa de la Figura 6 (izq.). De los análisis por subzona hi-

drográfica, vale la pena resaltar las cuencas de la Alta Guajira, del Caribe litoral (como los ríos Mulatos, San Juan y Canalete), el río Cesar, y del Alto y Bajo Magdalena, ya que es en donde se encuentran las subzonas con menor disponibilidad hídrica, con valores de escurrentía media inferiores a 500 mm al año. En contraste, las cuencas localizadas en las regiones del Atrato, Baudó, Tapaje y Dagua son aquellas que cuentan con la mayor disponibilidad de agua a nivel nacional, con valores de escurrentía en un año medio de más de 4000 mm al año.

La disponibilidad varía temporalmente de acuerdo con el régimen hidrológico de cada región. La variación se muestra en la Figura 6 (der.), en donde se identifica un periodo de menor escurrentía en los meses de diciembre a marzo en gran parte del país, con excepción de la región del Pacífico. De la misma manera, se observa un aumento considerable durante el trimestre de mayo a julio, en particular, en el Amazonas y el Orinoco.

Bajo la misma hipótesis de balance de largo plazo, se evalúan dos condiciones temporales teóricas para conocer las características extremas de la variabilidad hidrológica en el país. Estas condiciones se denominan “año seco” y “año húmedo”, y aunque no corresponden a un año específico, por estadística representan las condiciones extremas de un periodo continuo de enero a diciembre, asignándoles los valores mínimos y máximos multianuales, respectivamente.

Tabla 2. Variables medias multianuales de oferta hídrica por área hidrográfica para el periodo 1991-2020.

Área hidrográfica		Área (km^2)	Escurrentía (mm)	Oferta total (Mm^3)	Caudal medio (m^3/s)	Rendimiento (l/s/km^2)
1	Caribe	102.768	1.825	187.513	5.946	57,9
2	Magdalena - Cauca	270.872	975	263.986	8.371	30,9
3	Orinoco	346.099	1.504	520.507	16.505	47,7
4	Amazonas	341.567	3.565	714.758	22.665	66,4
5	Pacífico	77.386	2.093	275.862	8.748	113,0

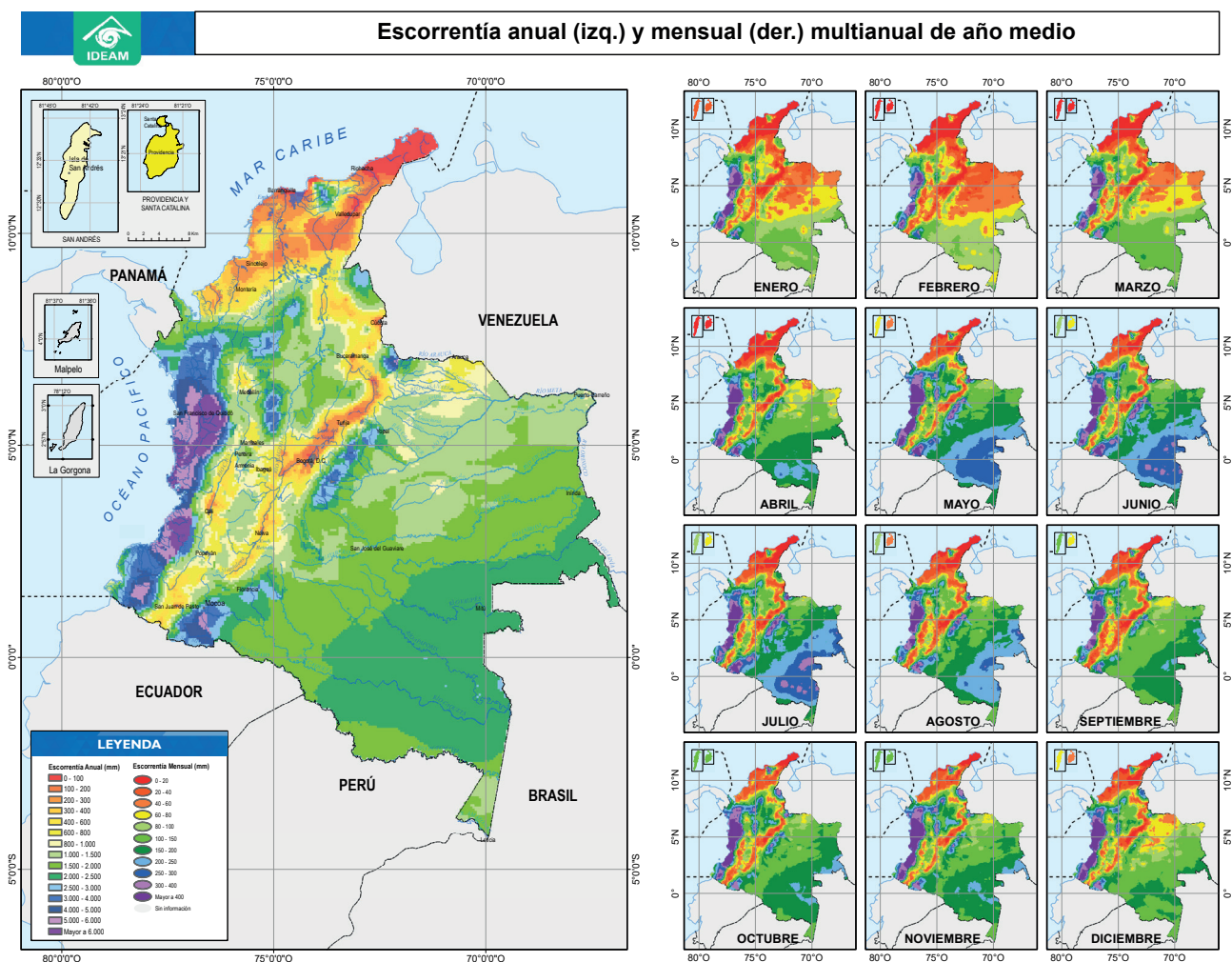


Figura 6. Escorrentía anual (izq.) y mensual (der.) multianual de año medio.

En la Figura 7 (izq.), se presenta el mapa de escorrentía para la condición teórica de año seco, en la cual la oferta se ve reducida en un 58 % con un promedio nacional de apenas 726 mm anuales, siendo más intensa la reducción en las áreas hidrográficas Caribe y Magdalena-Cauca, en especial en la región del golfo de Morrosquillo, el río Cesar, la Alta Guajira, las cuencas del Alto Magdalena y la cuenca del río Sogamoso. De la misma manera, a pesar de representar los mínimos extremos, se identifica que en las regiones del Amazonas y Pacífico se conservan escorrentías superiores a los 900 mm anuales.

El mapa de escorrentía anual de año húmedo se presenta en la Figura 7 (der.). Allí se muestra un aumento de escorrentía del 122 %, con un promedio nacional de 3.818 mm anuales; los mayores cam-

bios se presentan en las cuencas de la Alta Guajira, río Cesar, el Catatumbo, río Casanare, cuenca alta del río Meta (ríos Metica, Guayuriba, Guatiquía y Guacavía, Humea, Guavio, Lengupá, Upía y Cusiana) y la parte media del río Magdalena, en la región de los ríos Prado, Cabrera y Sumapaz.

No obstante la predominancia de altos valores de OHTS en este análisis, en las cuencas de los ríos Bogotá, Chicamocha, Cesar y Sinú, así como en las regiones del Catatumbo, Bajo Magdalena y Alta Guajira se estiman valores de escorrentía anual de menos de 500 mm al año. Se resalta la vulnerabilidad de algunas ciudades, como Bogotá D. C., Tunja, Bucaramanga, Cúcuta, Montería, Sincelejo, Cartagena, Barranquilla, Santa Marta, Valledupar y Riohacha, localizadas en estas áreas.

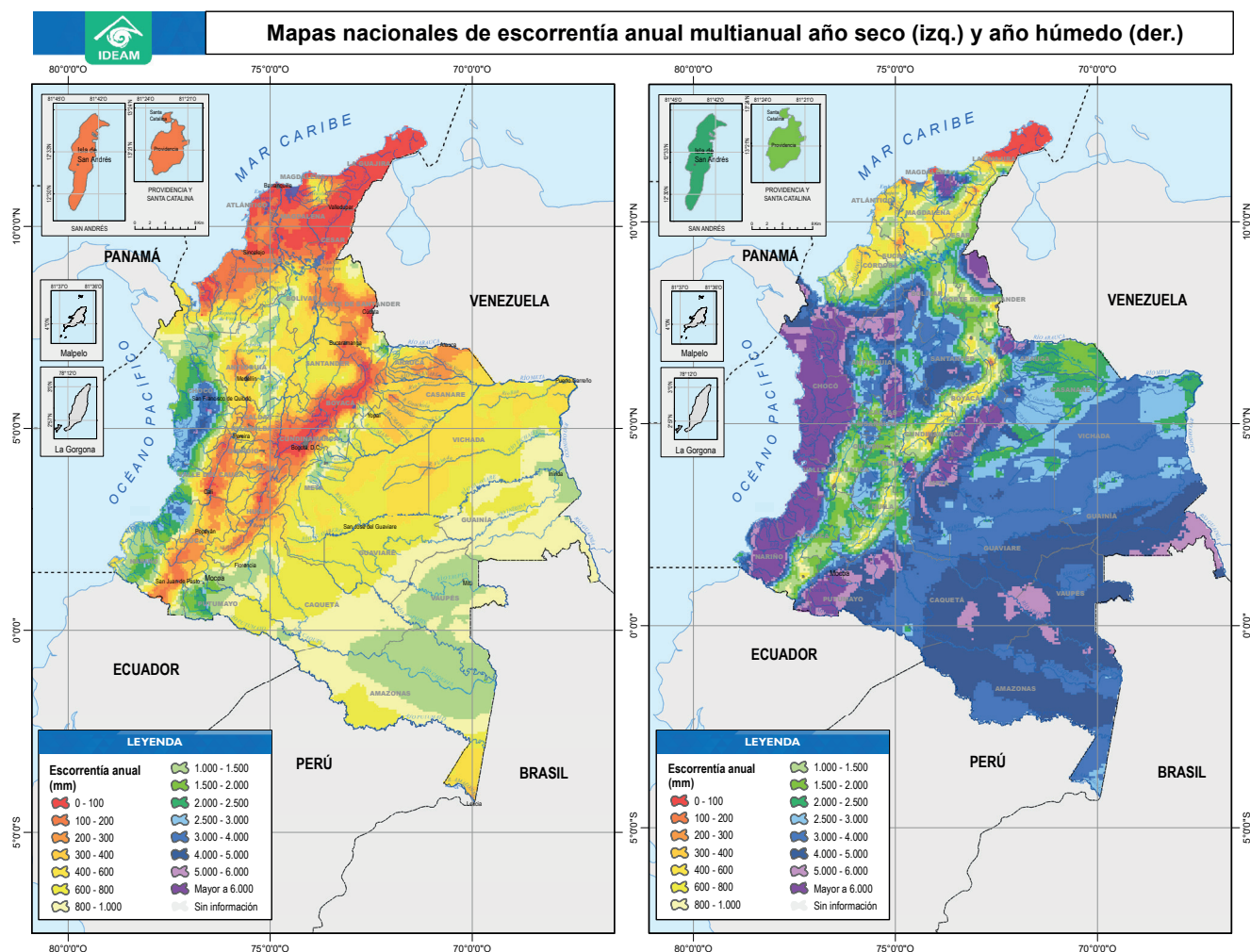


Figura 7. Mapas nacionales de escorrentía anual multianual de año seco (izq.) y año húmedo (der.).

Esta variación se observa con más detalle en los mapas mensuales de año seco presentados en la Figura 8 (izq.), donde se observan importantes disminuciones en las cuencas del piedemonte llanero, con valores de escorrentía muy bajos entre los meses de enero y abril.

Estos incrementos asociados con un año húmedo también se distribuyen de manera heterogénea a lo largo del año, como se ilustra en los mapas mensuales presentados en la Figura 8 (der.), en los cuales se observa una mayor afectación en los meses más húmedos de la condición de año medio, es decir, el periodo de abril a agosto. Para condiciones con rendimientos hídricos muy bajos y coeficiente de variación

muy alto, se identifican 14 subzonas hidrográficas, de las cuales 57 % están en el área Magdalena-Cauca y las restantes en el área del Caribe.

Oferta hídrica disponible multianual (OHD)

Los resultados de la OHD de año medio por área hidrográfica corresponden a la suma de los valores por subzona y se presentan en la Tabla 3. En esta tabla se destaca que la OHD está entre el 50 % y el 70 % de la OHTS, y la mayor cantidad de oferta se concentra en el Amazonas y el Orinoco, en particular, en las subzonas asociadas a los ríos Inírida, Guaviare, Vaupés, Apaporis, Cahuinarí, Caquetá, Putumayo e Igara Paraná que superan los 15.000 Mm³/año.

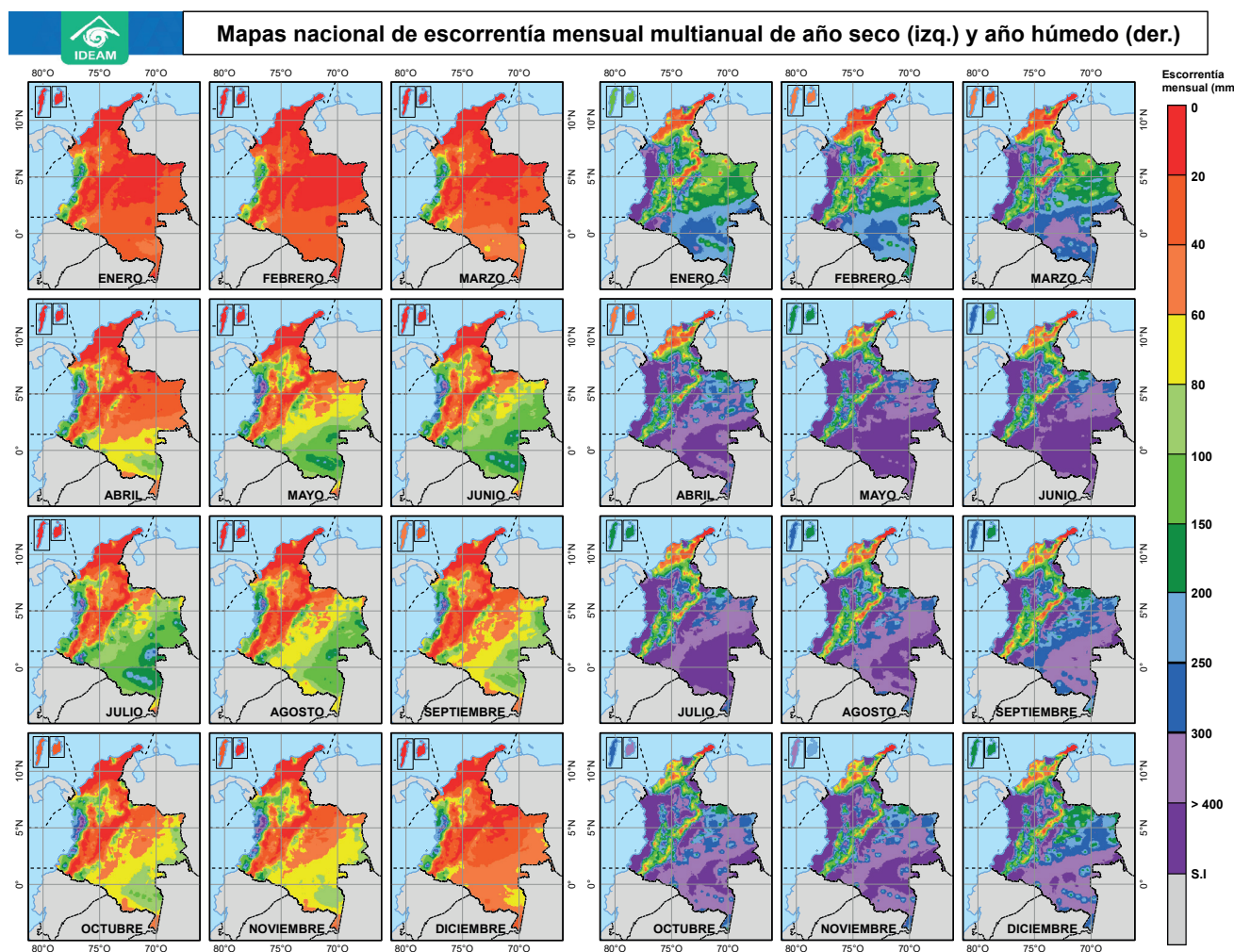


Figura 8. Mapas nacionales de escorrentía mensual multianual de año seco (izq.) y año húmedo (der.).

Tabla 3. Oferta hídrica disponible de año medio por área hidrográfica para el periodo 1991-2020.

	Área hidrográfica	Área (km ²)	Oferta disponible (Mm ³)
1	Caribe	102.768	93.922
2	Magdalena-Cauca	270.872	151.014
3	Orinoco	346.099	379.896
4	Amazonas	341.567	415.903
5	Pacífico	77.386	147.226

Por otro lado, las subzonas asociadas a los ríos Camarones, Timaná, Juncal, Desbaratado, Lili, Meléndez, Cañavalejo y Cali, así como la Alta Guajira, la ciénaga de Mallorquín y el lago de Tota tienen valores de OHD inferiores a los 100 Mm³/año. Los resultados completos de OHD multianual en las tres condiciones hidrológicas analizadas se presentan a nivel de subzona hidrográfica en el **Anexo 2** del documento ENA 2022.

Oferta hídrica total superficial histórica

La oferta hídrica superficial histórica describe la variación de la disponibilidad hídrica en el tiempo. Es estimada a través de la aplicación del modelo hidrológico Dynamic Water Balance DWB (Zhang et al., 2008), por medio del cual se obtie-

nen mapas diarios de escorrentía superficial que permiten entender los efectos hidrológicos de la variabilidad climática natural del país en diferentes escalas temporales y espaciales, así como articular los procesos de transformación antrópicos con los efectos en la regulación hídrica de los ecosistemas.

La variación anual de la OHTS histórica para las cinco áreas hidrográficas del país se muestra en la Figura 9, donde se identifican periodos húmedos que se presentaron en el país, como los de 1999-2000 y 2010-2011, que afectaron más que todo

las áreas Caribe, Magdalena-Cauca y Orinoco. Por otro lado, el Pacífico tuvo picos de humedad en los años 1984 y 2008 que afectaron en menor medida al resto del país.

Se observa que el área hidrográfica con mayor variabilidad en excesos es la de Magdalena-Cauca, que ha alcanzado anomalías hasta de un 50 % (año 2011) más grandes que la mediana; la siguen el Caribe y el Pacífico, con excesos del 29 % y 21 %, respectivamente. En cuanto a la variabilidad en condiciones bajas, los cambios en las cinco áreas hidrográficas oscilan entre -16 % y -21 %.

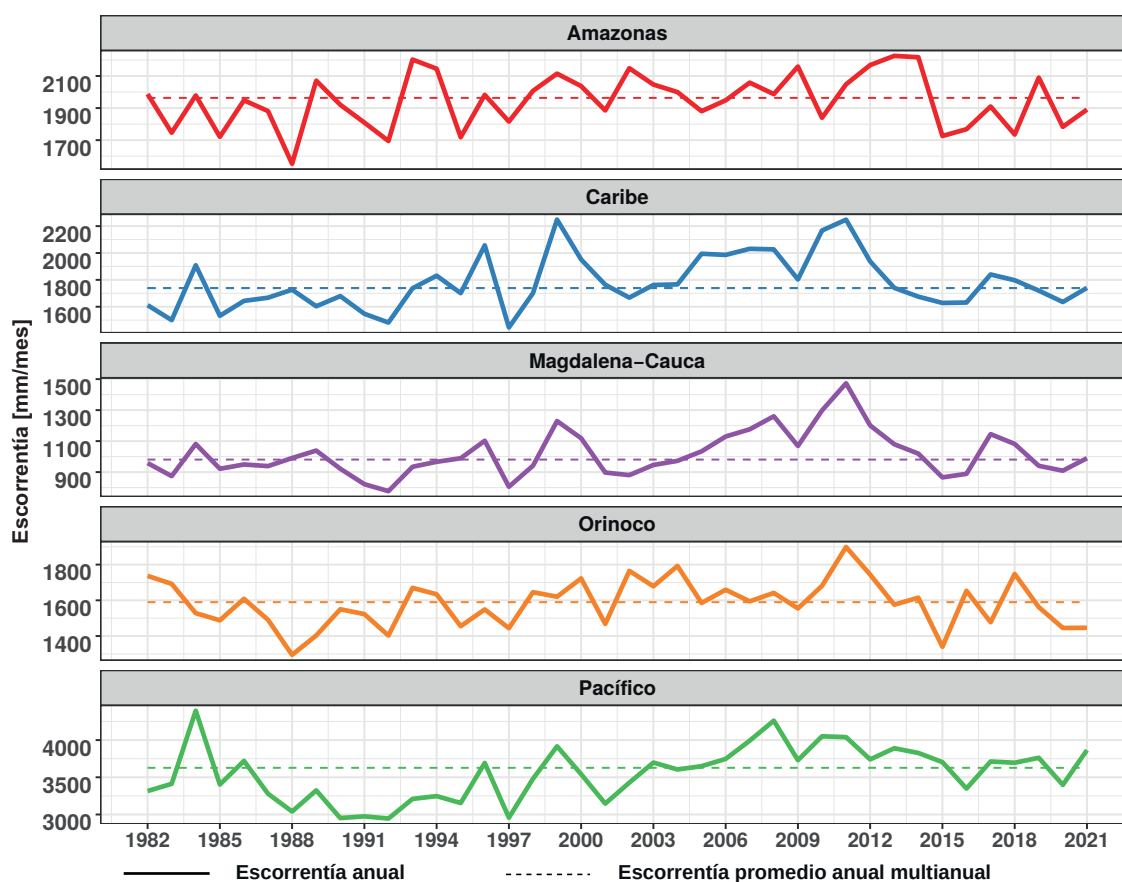


Figura 9. Escorrentías medias anuales por área hidrográfica para el periodo 1982-2021, resultantes del modelo DWB.

En este ENA se presentan también gráficas acumuladas por mes y por zona hidrográfica; se establecen las condiciones históricas del periodo 1982-2020 a partir de los percentiles 10, 25, 75 y 90, definiendo los rangos históricos característicos de condiciones

altas, medias y bajas; y se compara con los valores de los años 2020, 2021 y con el promedio histórico. En la Figura 10, se presenta una muestra de estas gráficas para una zona por área hidrográfica: Amazonas, Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Pacífico.

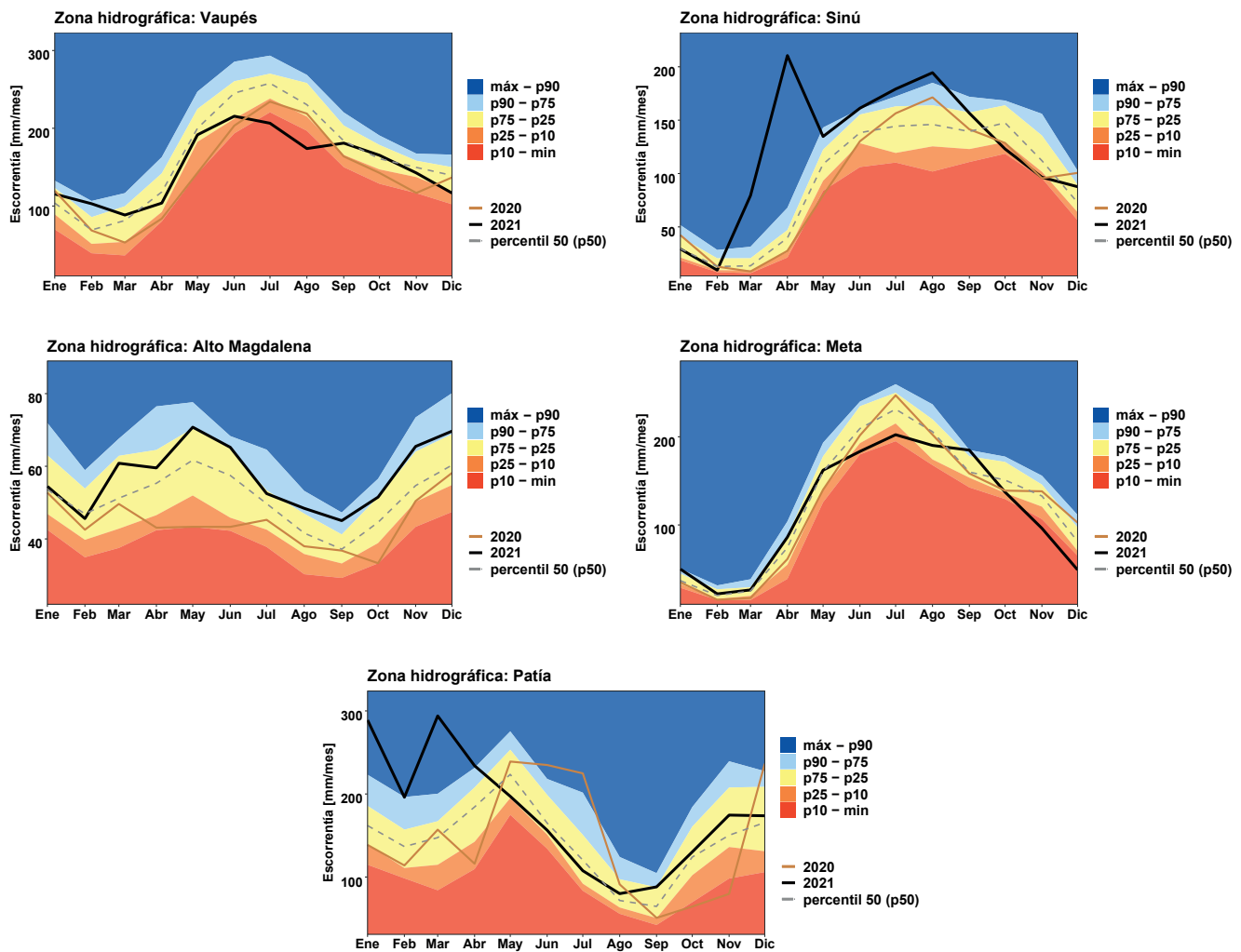


Figura 10. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en algunas zonas de las cinco áreas hidrográficas.

En general, durante 2021, se presentaron valores de escorrentía cercanos y superiores al percentil 75 durante el primer semestre del año en las áreas Caribe, Magdalena-Cauca y Pacífico; es decir, valores en un rango por encima de lo normal, influenciados por la presencia del fenómeno de La Niña durante el año 2021 y la presencia de vientos alisios fortalecidos en la cuenca central del Pacífico durante este periodo.

4.3 Eventos de sequía en Colombia

Las condiciones de sequía en el territorio —en función de su duración, extensión y magnitud— generan impactos sobre la población, incluso grandes

pérdidas económicas, de tal forma que se presentan afectaciones importantes en el bienestar de la sociedad y en las poblaciones asentadas en los territorios en donde se presentan estos fenómenos.

En este ENA 2022, se analizan por primera vez los eventos de sequía en Colombia, sus impactos en el ciclo hidrológico, y la afectación sobre las variables que hacen parte del flujo del agua en el subsuelo y en las corrientes hídricas, que pueden ser de mayor o menor magnitud y extensión dependiendo de la duración y de la intensidad del evento. Este análisis se efectúa a partir del uso de índices compuestos o multivariados que incorporan las variables de precipitación, humedad del

suelo y escorrentía. Se hace el análisis histórico de los eventos de sequía ocurridos para diferentes agregaciones temporales (1, 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses). Los resultados se presentan a nivel de zona hidrográfica, subzonas y departamentos.

El procedimiento metodológico se indica de manera resumida en la Figura 11, donde se relatan los pasos principales que son surtidos de manera secuencial para la obtención final de los índices en cada periodo de agregación.

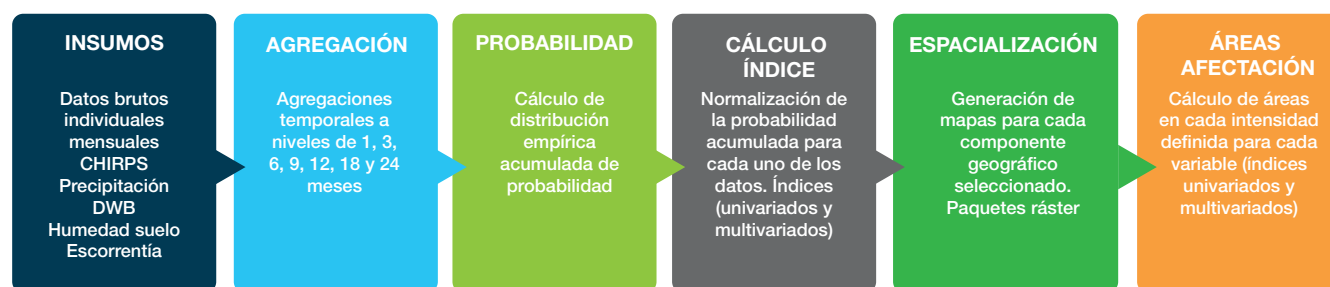


Figura 11. Metodología para generación de índices de sequía.

La generación de los índices se efectúa a partir de información tipo ráster, con resoluciones espaciales de 5 kilómetros para Colombia y temporales a nivel mensual para los años de 1983 a 2020, en las variables de precipitación, humedad del suelo y escorrentía.

De esta forma, los índices univariados permiten avanzar en análisis del déficit de humedad en función de una sola variable (déficit de lluvia, caudal, etc.). De forma análoga, los índices multivariados incluyen varios elementos que hacen parte del ciclo hidrológico en la caracterización de la sequía, en una combinación de indicadores meteorológicos como precipitación y evapotranspiración (Rangel et al., 2017).

Las agregaciones temporales permiten hacer énfasis en cada uno de los tipos de sequía de acuerdo con su propagación sobre cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. En este sentido, la primera afectación se evidencia sobre la precipitación en escalas de cortos periodos de tiempo (1-9 meses),

luego sobre la humedad del suelo (9-18 meses) y, por último, sobre la escorrentía superficial (18-24 meses). Eventualmente, la incorporación de una variable adicional que describa el comportamiento del agua subterránea podría ser tenida en cuenta como complemento para esta metodología.

Análisis de eventos de sequía a nivel nacional

Se realizaron análisis sobre cada uno de los índices calculados centrándonos en los tres univariados y en los índices multivariados que contemplan las tres variables —incluidas las agregaciones temporales (1, 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses) y analizado el promedio de cada índice a nivel departamental—, con lo cual se identifican en total 579 eventos en el territorio nacional. El resumen de los eventos identificados para los índices univariados (precipitación, humedad del suelo y escorrentía) y el índice multivariado con las tres variables (precipitación, humedad del suelo y escorrentía) para cada periodo de agregación se relaciona en la Tabla 4.

Tabla 4. Eventos de sequía identificados a nivel nacional.

Indicador	1 mes	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses	18 meses	24 meses
Precipitación	36	37	31	27	11	22	9
Escorrentía	31	32	25	12	4	12	2
Humedad del suelo	32	32	23	14	6	15	4
Precipitación-humedad-escorrentía	36	36	33	23	8	21	5

En el ENA 2022, se identifican los eventos de sequía ocurridos en el territorio nacional en el periodo de análisis de 1983 a 2020, y se determina el número de meses en promedio de duración de los eventos, el valor mínimo del índice en cada periodo de agregación, la magnitud acumulada en promedio y el número de eventos para cada agregación e índice.

Eventos a nivel departamental

El mayor número de eventos en el periodo de análisis (1983-2020) se encontró en el departamento del Vichada, en donde se identificaron 748, número que está 29 % por encima del promedio de eventos de todos los departamentos. En Arauca y Casanare se reconocieron 734 y 733 eventos, respectivamente, con un porcentaje por encima del promedio departamental de 26 %. Así mismo, en el departamento del Meta se cuantificaron 714 eventos y un porcentaje de 23 % por encima del promedio de eventos a nivel departamental. Por otro lado, en el departamento del Huila se registraron 427 eventos, un 26 % por debajo del promedio departamental, y en el Tolima se presentaron 474, un porcentaje de un 18 % bajo el promedio.

Las zonas hidrográficas donde se identifica mayor número de eventos de sequía corresponden a la zona de Orinoco-Directos, Tomo, Meta, Vichada, Guaviare, Sinú y Caribe-La Guajira, todas con un porcentaje por encima del 30 % respecto al promedio de eventos registrados en las zonas hidrográficas en el país, que corresponde a un número de 585. Así mismo, las zonas que evidencian un menor número de eventos corresponden a Tapaje-Dagua, San Juan y Baudó Directos Pacífico, con eventos que corresponden a un porcentaje cercano al 30 % por debajo de la media del total de eventos.

Análisis de eventos de sequía a nivel de zonas hidrográficas

A nivel de zona hidrográfica se identifican 22.248 eventos, de los cuales se reconocen 6.010 con la aplicación de índices multivariados, mientras que con el uso de índices univariados se identifican 16.238 eventos de sequía. Se incluyen análisis para 38 zonas hidrográficas en el territorio nacional que cuentan con información generada dentro del pro-

ceso. En el ENA 2022 se presenta la consolidación de la totalidad de los eventos identificados a nivel de cada una de las zonas hidrográficas para los índices univariados y multivariados. Así mismo, se presentan los eventos a nivel municipal y por subzonas hidrográficas.

Análisis del evento de sequía (severo) de mayo de 2016 y julio de 2017, para un periodo de agregación de 24 meses

En el ENA 2022 se caracteriza el evento ocurrido en el 2016, que corresponde a un fenómeno de El Niño que inició en octubre de 2014, se extendió hasta abril de 2016 y culminó cerca de 2018. Para este evento se realizaron análisis con los índices univariados y multivariados para un periodo de agregación de 24 meses. Se evidenció que el índice multivariado identifica el evento meses antes (mayo a junio de 2015), mientras que los índices univariados lo identifican meses después (septiembre a noviembre de 2015). De la misma manera, su terminación es más precisa con el análisis de índices multivariados que logran identificar sus efectos 3 o 4 meses después de lo que registran los índices univariados.

La espacialización del evento ocurrido en 2016 —tomando como inicio el mes de mayo de 2016 y hasta julio de 2017— evidencia la forma en que el índice multivariado estandarizado de precipitación humedad del suelo-escorrentía y agregación de 24 meses evoluciona y se extiende en el territorio nacional, como lo muestran los mapas de la Figura 12.

Es posible evidenciar el alcance del fenómeno en diferentes regiones del territorio nacional en las que este índice multivariado alcanza los valores más bajos de toda la serie presentados en octubre de 2016, los cuales corresponden a una sequía severa según la clasificación establecida.

Con el propósito de hacer un análisis integral de los índices obtenidos y de generar un índice que permita hacer comparaciones en la ventana temporal incluida en el estudio, se establece el índice multivariado de sequías integrado (IMSI). Este incorpora el cálculo de los índices explicados e integra los valores de magnitud de los eventos y su duración en la ventana temporal de análisis para cada uno de los

índices calculados y para cada una de las agregaciones espaciales definidas. El IMSI se aplicó a nivel departamental y municipal y de zonas y subzonas hidrográficas.

A nivel de zonas hidrográficas, los IMSI para todas las agregaciones evidencian comportamiento de los fenómenos de sequía en las zonas de Apure, Napo, Baudó y Directos al Pacífico, lo que muestra que en estas zonas hidrográficas los eventos presentados

han tenido duraciones y magnitudes importantes en comparación con los eventos presentados en las otras zonas hidrográficas. Por el contrario, en las zonas del Putumayo y del Patía se encuentra que los eventos presentan duraciones e intensidades menores, desde la óptica de todos los índices. En el mapa de la Figura 13 es notable la forma como la Orinoquía colombiana se encuentra en la clasificación de alto y muy alto, lo que denota una incidencia mayor de los eventos de sequía en esta región del país.

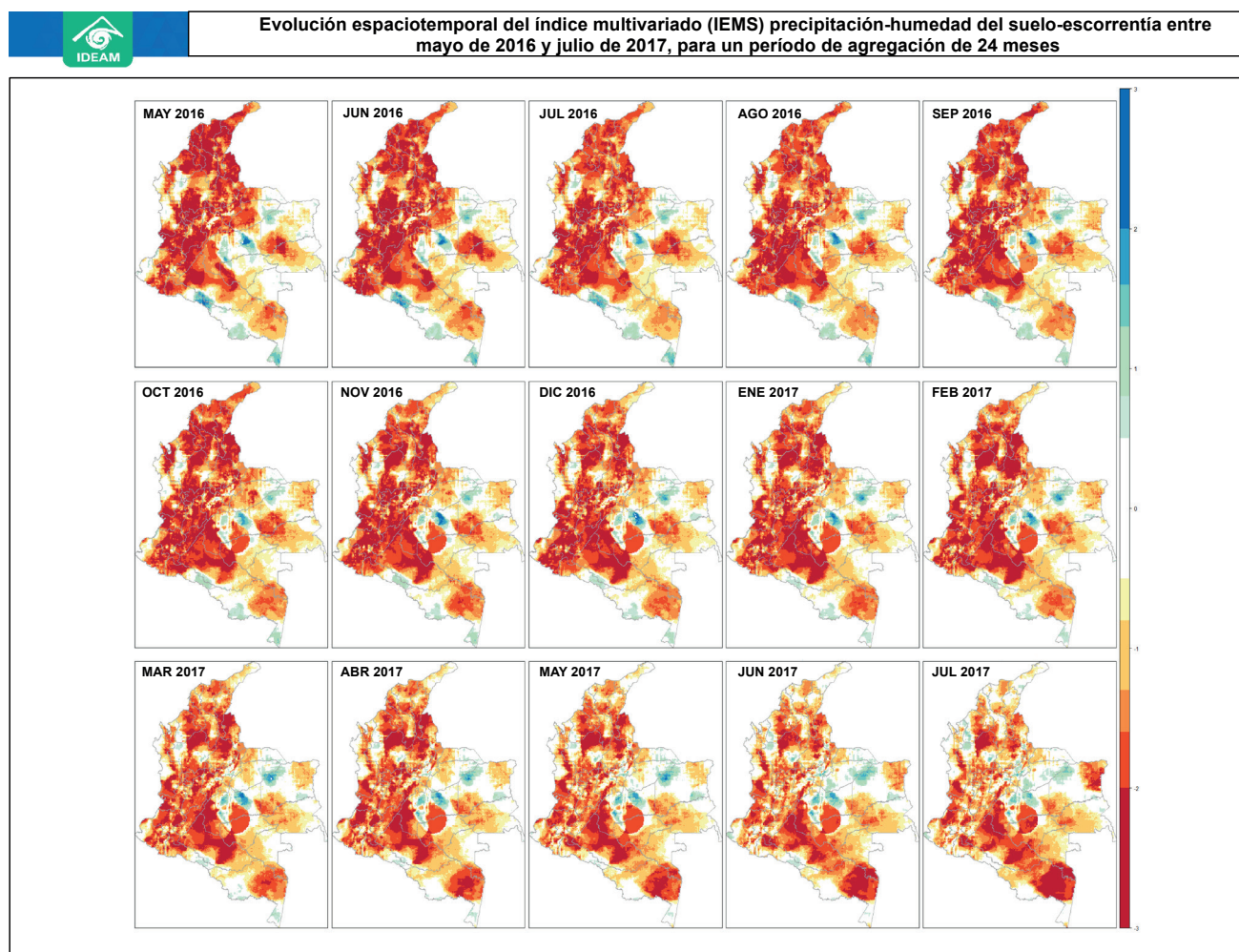


Figura 12. Evolución espaciotemporal del índice multivariado (IEMS) precipitación-humedad del suelo-escurrentía entre mayo de 2016 y julio de 2017, para un periodo de agregación de 24 meses.

En cuanto a departamentos, los que evidencian mayor incidencia son los de Atlántico, Quindío y Vaupés; en contraste, los departamentos de Amazonas y Nariño muestran menor incidencia de eventos de

sequía en su territorio. De manera similar a como se hizo con las zonas hidrográficas, se observa la incidencia de los eventos de sequía en los departamentos que corresponden al área de la Orinoquía.

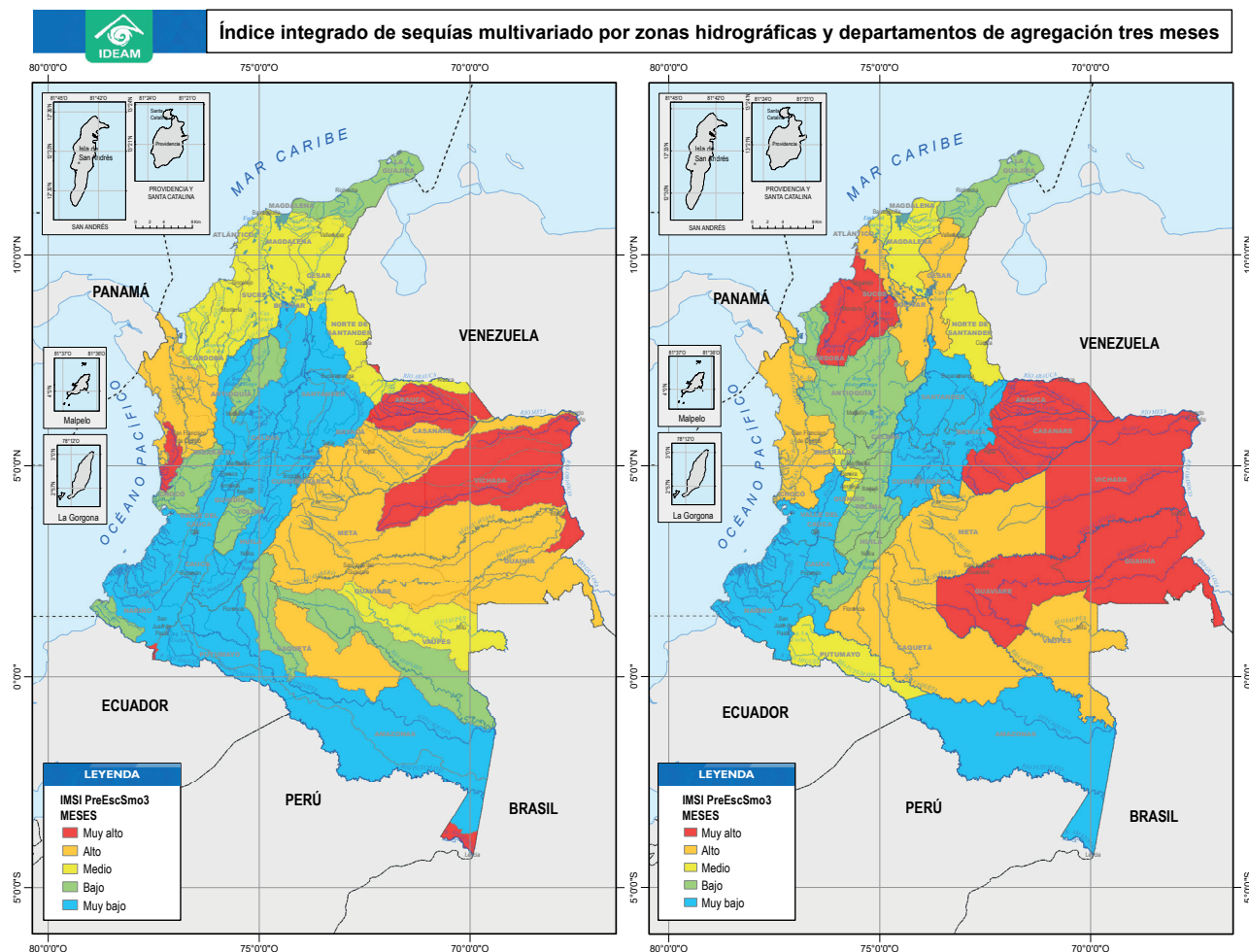


Figura 13. Índice integrado de sequías multivariado por zonas hidrográficas y departamentos agregación tres meses.

4.4 Dinámica de las inundaciones y características de cuerpos de agua lénticos

El análisis de la dinámica de inundaciones para el territorio colombiano ha sido liderado por el Ideam con la incorporación sistemática de diferentes productos de sensores remotos que han soportado la evaluación de las áreas afectadas por estos procesos. Además, en esta evaluación se integra información correspondiente a ecosistemas acuáticos y coberturas asociadas, para lo cual se emplean no solo las fuentes de datos nacionales, sino también los productos de acceso global.

Se identifican las zonas potencialmente inundables (ZPI) y la transformación de estas; se identifican los cuerpos de agua lénticos con base en

los insumos cartográficos y estudios disponibles a escala nacional. A nivel regional, se relacionan los mapas de inundación a escala 1:2000 elaborados por Ideam y generados entre 2018 y 2021. Igualmente, se presenta el consolidado de eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas con base en lo realizado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2021) para el periodo comprendido entre el 2000 y el 2021. Para el nivel regional, se presentan los resultados de la caracterización hidrológica, hidráulica, hidrobiológica, fisicoquímica y sedimentológica de cuerpos de agua en el lago de Tota, las ciénagas de Zapatosa y Ayapel, y el río La Vieja.

Los procesos de inundación son fenómenos hidrológicos recurrentes y hacen parte de la dinámica

propia de los cuerpos de agua; y pueden ser considerados como un recurso (por ejemplo, cuando favorecen la producción agrícola) o como una amenaza, debido a las pérdidas físicas, humanas y económicas sobre una población (Ideam, 2017).

Zonas potencialmente inundables y ecosistemas acuáticos lénticos y lóticos

En el ENA 2018, el Ideam definió una zona potencialmente inundable (ZPI) como aquel terreno o espacio donde se puede acumular y generar una lámina de agua como resultado del desborde de un cuerpo de agua o como producto de lluvias localizadas. El esquema de la Figura 14 muestra la metodología para definir las ZPI e identificar los cuerpos de agua lénticos y lóticos a escala nacional. La delimitación de una ZPI parte del concepto de ecosistemas acuáticos transicionales, definidos por Ideam et al. (2017) como aquellas áreas donde el suelo está saturado de agua o inundado una parte del año, y pueden tener diferente tem-

poralidad de las inundaciones y el drenaje. Los cuerpos de agua corresponden a los demás ecosistemas acuáticos (lóticos y lénticos) existentes en el territorio nacional.

Zonas potencialmente inundables intervenidas de manera antrópica

Se identifica el grado de intervención antrópica existente sobre las ZPI a partir de aquellas unidades donde existen territorios artificializados o agrícolas. Para la actualización de las áreas o zonas intervenidas por actividad antrópica, se aplica la metodología del esquema de la Figura 15.

En la Tabla 5 y en la Figura 16, se presentan las zonas potencialmente inundables intervenidas por actividad antrópica, naturales y seminaturales respecto al total nacional de ZPI por áreas hidrográficas. En el ENA 2022, se realiza un análisis a nivel de zona y subzona hidrográfica que indica las tasas de cambio entre 2010 y 2018.

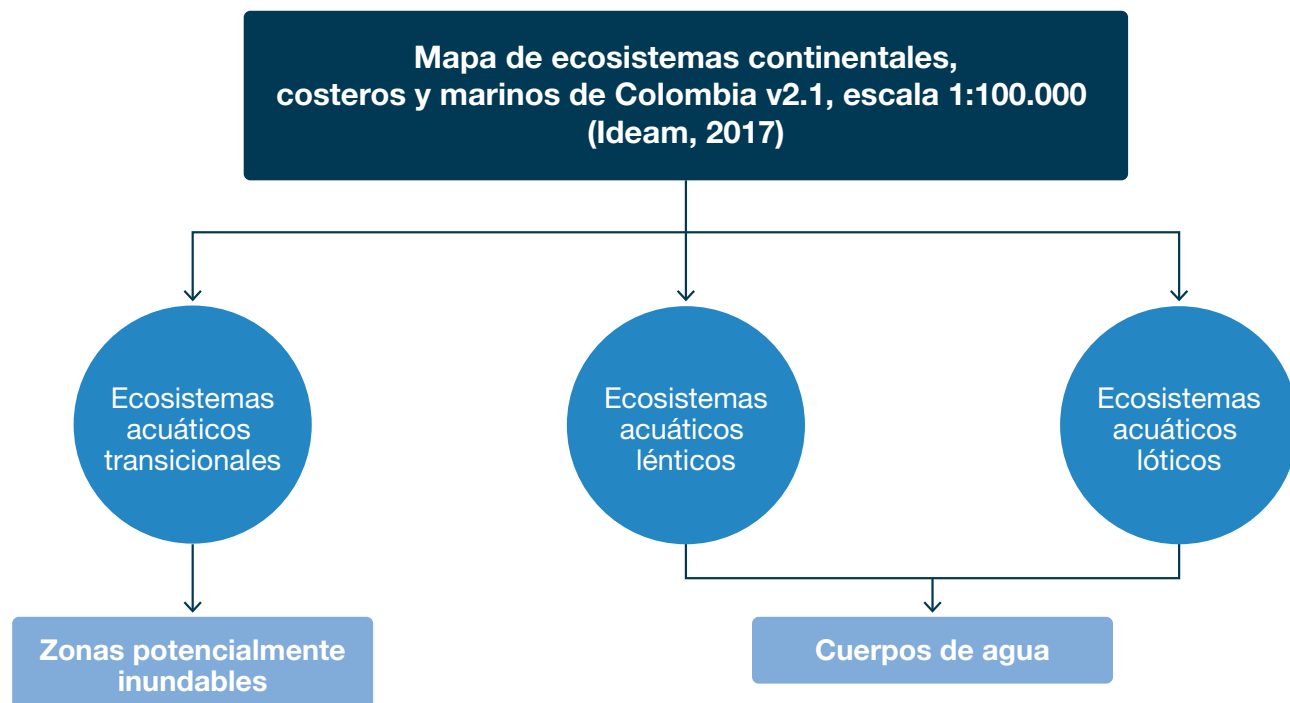


Figura 14. Metodología para la definición de ZPI y cuerpos de agua.

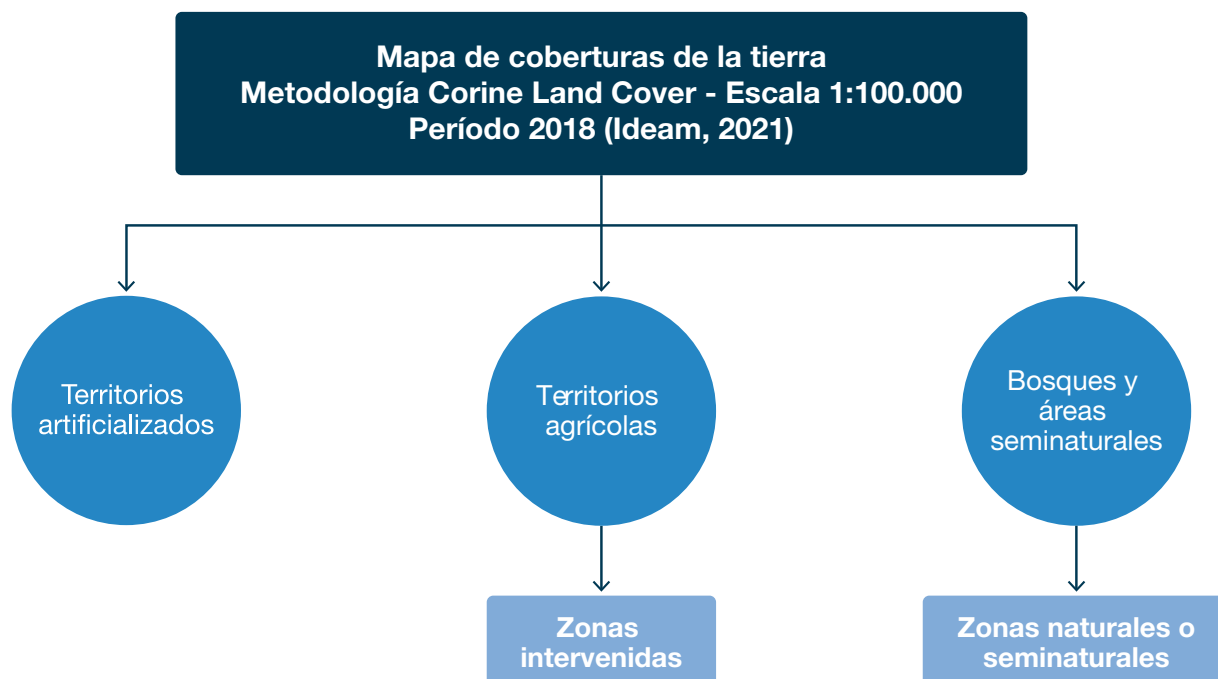


Figura 15. Metodología para la definición de áreas o zonas intervenidas por actividad antrópica dentro de las ZPI.

Tabla 5. Áreas de zonas potencialmente inundables naturales y transformadas.

Área hidrográfica	Área (km ²)		
	Zonas potencialmente inundables (ZPI)	Transformada	Natural
Amazonas	34.092	3.423	30.461
Caribe	14.047	5.481	7.340
Magdalena-Cauca	24.003	14.254	5.467
Orinoco	107.165	15.924	88.952
Pacífico	11.156	1.861	8.988
Total nacional	190.463	40.943	141.208

En el área hidrográfica del Orinoco, el espacio ocupado por las ZPI intervenidas por actividad antrópica corresponde a 15.924 km², lo que constituye el 39 % del total a nivel nacional de las áreas modificadas por actividades agrícolas o de urbanización; mientras tanto, para el área hidrográfica Magdalena-Cauca, estas zonas ocupan 14.254 km² (35 %). Con relación a las demás áreas, el territorio ocupado es de 5.481 km² (13 %), 3.423 km² (8 %) y 1.861 km² (5 %), para el Caribe, Amazonas y Pacífico, respectivamente.

Son de resaltar las áreas intervenidas por actividades agrícolas y artificializadas en los departamentos de Casanare y Antioquia, con áreas que alcanzan los 8.847 km² y 3.689 km², respectivamente; mientras que las Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, así como los departamentos de Risaralda y la Amazonía, presentan los menores cambios en sus coberturas, con 0 km², 3 km² y 47 km², respectivamente.



En el Anexo 1 del documento ENA 2022, se incluyen las áreas y sus correspondientes porcentajes de ocupación de zonas potencialmente inundables, naturales o seminaturales e intervenidas, por actividad antrópica, para las 316 subzonas hidrográficas. Se resaltan las SZH con mayor porcentaje de área con respecto al total nacional de zonas intervenidas por actividad antrópica. Las SZH con mayor porcentaje de área con respecto al total nacional son: Bajo San Jorge La Mojana, con el 9,89 %; río Pauto y otros directos al Meta (4,69 %); Caño Guanápalo y otros directos al Meta (3,46 %), río Túa y otros directos al Meta (3,28 %), y río Cusiana (3,01 %).

Mapas de inundaciones asociadas a la ocurrencia de fenómenos de La Niña

El Ideam ha evaluado la extensión de inundaciones asociadas con la ocurrencia de fenómenos de La Niña de diferente intensidad para los años 1988, 2000, 2010-2011 y 2011-2012 a escala 1:100.000, a partir de información satelital. Esta evaluación está concentrada en las regiones Andina, Pacífica y Caribe, por ser las que experimentaron las más altas precipitaciones durante el evento 2010-2011, así como la más grande afectación por inundaciones.

Eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas

Estos eventos son entendidos como una eventualidad, un hecho imprevisto que puede acaecer y producir efectos adversos sobre las vidas humanas, la salud o la infraestructura económica, social y ambiental de un territorio (UNGRD, 2017). En par-

ticular, se presenta la evolución de eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas a nivel departamental para el periodo comprendido entre el 2000 y el 2021.

El inventario de eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas sobre el territorio nacional se elaboró a partir del consolidado de emergencias realizado por la UNGRD (2021) para los años entre 2000 y el 2021, y se identificaron un total de 15.898 eventos. En particular, los departamentos de Cundinamarca (1.133 eventos) y Antioquia (1.124 eventos) son los que presentan el mayor registro de eventos de inundación reportados. En cuanto a municipios, los que más se han visto afectados por este tipo de eventos son Bogotá, Villavicencio, Barranquilla, Ibagué y Pereira.

Respecto de avenidas torrenciales y crecientes súbitas, los departamentos de Cauca, Antioquia y Norte de Santander presentan las mayores incidencias. Se resalta que, a nivel municipal, Inzá, Miranda y Corinto (ubicados en el departamento de Cauca) son los que presentan mayor número de estos eventos.

El consolidado de eventos de inundación a nivel nacional para el periodo comprendido entre el 2000 y el 2021 se muestra en la Figura 17. Se grafican todos los 13.577 eventos registrados. La mayor cantidad de inundaciones se presentaron en el año 2011, y representan un 13 % del total reportado. Es importante señalar que, a partir de ese mismo año, los registros analizados cuentan con un mayor detalle en su caracterización por parte de la UNGRD.

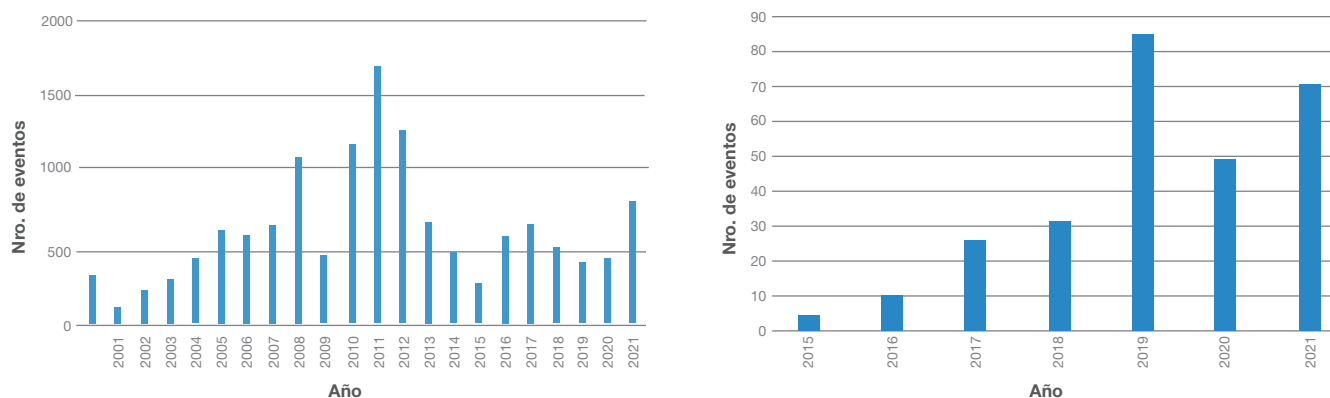


Figura 17. Número de eventos de inundación (izq.) entre 2000 y 2021, y de avenidas torrenciales (der.) 2015-2021, a nivel nacional.

Con respecto a las avenidas torrenciales, los datos de la UNGRD (2021) indican que solo en años recientes (desde 2015) se comenzaron a registrar explícitamente este tipo de eventos. Para este periodo, se reportaron un total de 269 eventos, con un pico que se presentó en el 2019, seguido por otro el año 2021, lo que representa un 31 % y un 21 % del total de eventos reportados.

Estudios de amenaza de inundación a nivel regional y local

En la Tabla 6, se relacionan los centros poblados para los cuales se han elaborado estudios de

amenaza de inundación desde el 2018 hasta la fecha; cuentan con mapas de profundidad (metros), velocidad (metros/segundo) y amenaza de inundación (categoría alta, media y baja) para diferentes periodos de retorno (2,33 años, 10 años, 20 años, y 50 y 100 años) a escala 1:2000.

Estos estudios detallados tienen como objetivo primordial aportar insumos para las entidades y la comunidad en general, de modo que permitan orientar la reglamentación en el uso del suelo y la gestión territorial.

Tabla 6. Mapas de inundación generados por el Ideam entre 2018 y 2021 a escala 1:2000.

Nro.	Centro poblado	Municipio	Departamento	Año
1	La Sierra	Puerto Nare	Antioquia	2018
2	Puerto Berrío	Puerto Berrío	Antioquia	2018
3	Puerto Nare	Puerto Nare	Antioquia	2018
4	Puerto Perales	Puerto Triunfo	Antioquia	2018
5	Puerto Triunfo	Puerto Triunfo	Antioquia	2018
6	Cantagallo	Cantagallo	Bolívar	2018
7	Puerto Boyacá	Puerto Boyacá	Boyacá	2018
8	Puerto Serviez	Puerto Boyacá	Boyacá	2018
9	Girardot	Girardot	Cundinamarca	2018
10	Guataquí	Guataquí	Cundinamarca	2018
11	Puerto Bogotá	Guaduas	Cundinamarca	2018
12	Ricaurte	Ricaurte	Cundinamarca	2018
13	Aipe	Aipe	Huila	2018
14	Villavieja	Villavieja	Huila	2018
15	Puerto Olaya	Cimitarra	Santander	2018
16	Puerto Wilches	Puerto Wilches	Santander	2018
17	Ambalema	Ambalema	Tolima	2018
18	Flandes	Flandes	Tolima	2018
19	Guataquisito	Piedras	Tolima	2018
20	Honda	Honda	Tolima	2018
21	Natagaima	Natagaima	Tolima	2018
22	Purificación	Purificación	Tolima	2018
23	Murindó	Murindó	Antioquia	2019
24	Opogadó	Murindó	Antioquia	2019
25	Vigía del Fuerte	Vigía del Fuerte	Antioquia	2019

Nro.	Centro poblado	Municipio	Departamento	Año
26	Atrato (Yuto)	Atrato (Yuto)	Chocó	2019
27	Bagadó	Bagadó	Chocó	2019
28	Bojayá (Bellavista)	Bojayá (Bellavista)	Chocó	2019
29	Boraudó	Lloró	Chocó	2019
30	Carmen del Darién (Curbaradó)	Carmen del Darién (Curbaradó)	Chocó	2019
31	Domingodó	Carmen del Darién (Curbaradó)	Chocó	2019
32	La Vuelta	Cértégui	Chocó	2019
33	Lloró	Lloró	Chocó	2019
34	Medio Atrato (Beté)	Medio Atrato (Beté)	Chocó	2019
35	Quibdó	Quibdó	Chocó	2019
36	Riosucio	Riosucio	Chocó	2019
37	Tagachí	Quibdó	Chocó	2019

Cuerpos de agua lénticos

La definición de cuerpos lénticos se basa en la extracción y agrupación de todos los ecosistemas acuáticos de ambiente léntico del *Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia* (Ideam et al., 2017), donde se definen como lagos o lagunas que son cuerpos de agua dulce que se encuentran alejados del mar y suelen tener un origen glaciar, tectónico o aluvial. La agrupación de las diferentes clases de cuerpos lénticos parte de las siguientes consideraciones definidas por el Ideam en el ENA 2018: (a) *embalses*: hacen parte de los cuerpos de agua artificiales y su

principal rasgo es que son contruidos por el hombre; (b) *lagos y lagunas*: cuerpos de agua dulce que se encuentran alejados del mar y están asociados a un origen glaciar, tectónico o aluvial; (c) *ciénagas*: se identifican como tales las lagunas de origen aluvial y las lagunas costeras.

La Tabla 7 muestra la distribución y área promedio del espejo de agua de cuerpos lénticos en el territorio nacional por áreas hidrográficas. Se observa que la mayoría de las ciénagas y embalses se encuentran ubicados en el área hidrográfica Magdalena-Cauca y la mayor parte de lagos y lagunas se hallan en el área hidrográfica del Orinoco.

Tabla 7. Distribución de cuerpos de agua lénticos por área hidrográfica.

Área hidrográfica	Área (km²)		
	Ciénaga	Embalses	Lagos y lagunas
Amazonas	302,4	--	44,4
Caribe	789,4	73	0,3
Magdalena-Cauca	7.020,5	509,4	51,7
Orinoco	1.007,6	37,1	71
Pacífico	78,5	24,6	3,1
Total nacional	9.198,4	644,1	170,5

Los departamentos de Bolívar y Magdalena presentan la mayor cobertura referente a ciénagas, con áreas de 2.520 km² y 1.882 km² que corresponden al 27 % y 20 % del total nacional, respectivamente. La mayor ocupación de embalses en el territorio nacional está en los departamentos de Antioquia (150 km²) y Atlántico (138 km²), lo que representa el 23 % y 21 % del total de área de embalses a nivel nacional. En contraste con estas cifras, los lagos y las lagunas se concentran en los departamentos de Boyacá y Nariño, con áreas de 63 km² y 48 km², lo

que representa el 37 % y el 28 % del área existente de estas unidades a nivel nacional.

Estudios de caracterización de cuerpos de agua lénticos

A escala local, tanto el Ideam como otros actores han avanzado en conjunto en la caracterización hidrológica, hidráulica, hidrobiológica, fisicoquímica y sedimentológica de diferentes cuerpos de agua, los cuales se presentan a continuación en la Tabla 8:

Tabla 8. Estudios realizados sobre cuerpos lénticos a nivel local.

Lugar del estudio	Tipo de estudio	Fecha
Cuenca del lago de Tota	Modelación hidrológica y levantamiento topobatiométrico	2020
Cuenca del río Cesar	Modelación hidrológica	2021
Complejo cenagoso de Zapatosa	Modelación ecohidrológica (trófica e hidrodinámica)	
Complejo cenagoso de Ayapel	Modelación hidrológica y socioecológica	

En el documento del ENA se muestran los avances en el conocimiento sobre la hidrología de la cuenca del lago de Tota, además de los resultados de la modelación ecohidrológica de las cuencas de las ciénagas de Zapatosa, Ayapel y del río La Vieja.

4.5 Evolución y dinámica de los glaciares y su relación con la alta montaña

Los glaciares —y la criosfera en general— están ofreciendo señales claras del ritmo del actual cambio climático. Como parte del agua superficial, en el tema de glaciares y su relación con la alta montaña, se presentan el estado actual y la tendencia de los glaciares nacionales mediante dos indicadores ambientales usados globalmente: balances de masa y área de glaciar. El primero refleja las pérdidas o las ganancias de masa que se relacionan con el comportamiento de la tropósfera y con las condiciones físicas locales; y el segundo establece el ritmo al cual mengua esta cobertura. Se complementa la información con las relaciones hídricas que tiene el sistema glaciar con los demás ecosistemas de la alta montaña colombiana: el páramo y el bosque altoandino.

Los años 2021 y 2022 estuvieron marcados por incrementos de las precipitaciones por encima de lo normal en la región Andina colombiana, las cuales impactaron las altas montañas. Durante estos años, se registraron indicadores moderados de valores que —según los boletines de seguimiento al ciclo ENSO (El Niño Oscilación del Sur) del Ideam— se interpretan como condiciones del fenómeno climático extremo La Niña, fenómeno de variabilidad climática que impactó los nevados con mayor precipitación y acumulación de nieve y granizo y, por ende, con una ligera reducción en las pérdidas de masa glaciar.

Evolución del área glaciar en Colombia

La cobertura glaciar en Colombia ha disminuido en forma progresiva, y en el siglo XX se han extinguido ocho pequeños glaciares. Durante los últimos 170 años, el área glaciar en Colombia se redujo un 90 %; y en la última década (2010-2020), un 26 % (Figura 18). El área glaciar colombiana (2021) es de 33,9 +/-0,82 km². De acuerdo con el seguimiento a esa reducción, desde la década de los años noventa ese ritmo promedio ha sido del 3 % al 5 % anual; pero, entre 2017 y 2021 se destaca que la reduc-

ción del área glaciar colombiana fue de 7,8 % (2,85 km²). De persistir esta tendencia, es probable que, a finales de este siglo, los glaciares colombianos estén completamente extintos o bastante disminuidos (Rabatel et al., 2018).

Según su altitud, tamaño, exposición a la radiación solar y condiciones climáticas y físicas locales, esta tendencia ha sido diferencial para cada glaciar. De hecho, para el glaciar Santa Isabel, que es el de menor altitud y tamaño, debido a su contenido de ceniza volcánica —que acelera la fusión del hielo— y su tendencia a la disminución de precipitaciones sólidas, se prevé que su extinción

total se dará durante la presente década (Ideam, 2021). Entre 2017 y 2021, fue el glaciar con el mayor ritmo de derretimiento (se destaca para este glaciar que, a inicios de 2022, se extinguieron los dos últimos relictos de hielo que drenaban hacia la cuenca del río Otún). Por el contrario, desde 2017, la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán registra una relativa estabilidad, incluso con ganancias de masa, situación atribuida tanto a condiciones climáticas locales como a su mayor tamaño y altitud. Para el periodo 2021 y 2022, la reducción de área persistió, aunque con un ritmo ligeramente menor, debido a la influencia de La Niña que incrementó las precipitaciones sólidas.

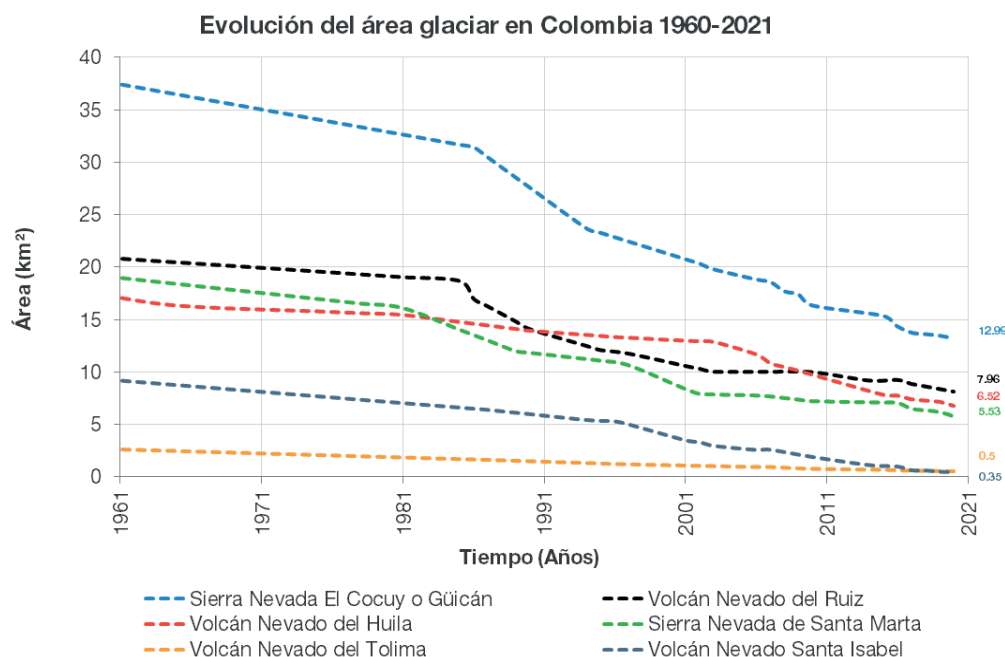


Figura 18. Evolución de la cobertura glaciar en Colombia en las últimas seis décadas.

Balance de masa glaciar

Así como el seguimiento a la reducción del área glaciar constituye un indicador ambiental sobre la tendencia del cambio climático global y regional, el trabajo de medir y estudiar en terreno el comportamiento de los dos primeros metros de la superficie de un glaciar —que es la parte más sensible a la dinámica de baja tropósfera— resulta ser un excelente segundo indicador ambiental, necesario para comprender mejor la relación clima-glaciar y con ello la sensibilidad climática de la alta montaña.

Este indicador es conocido como *balance de masa glaciar* y, de manera coloquial, puede decirse que representa el estado de salud de un glaciar.

Este indicador, que expresa las pérdidas o ganancias de masa de un glaciar durante un lapso y con base en datos en terreno, se calculó para dos glaciares colombianos que manifiestan comportamientos disímiles. Por un lado, el balance de masa del glaciar Santa Isabel (Figura 19, izq.) continúa mostrando un total desequilibrio con el clima, con pérdidas continuas de masa desde marzo de 2006 a noviembre

de 2022; un total de 55 metros equivalentes de agua (m e. a.), una cifra muy por encima del valor mundial (24 m.e.a. desde mediados de la década de 1970 para un conjunto de glaciares de referencia global). Durante el periodo de enero de 2018 a noviembre de 2022, el balance de masa fue de 17,7 m.e.a. De acuerdo con las observaciones y registros del Ideam, su derretimiento se ha visto principalmente

influenciado por su baja altitud, contenido de ceniza volcánica (menor albedo) y escasa precipitación sólida. Caso diferente muestra el balance de masa en la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán, sector Ritacuba Blanco, en donde el acumulado desde enero de 2009 a octubre de 2022 es de 1,0 m.e.a.; y para el periodo de febrero de 2018 a octubre de 2022 fue de +1,8 m.e.a. (Figura 19, der.).

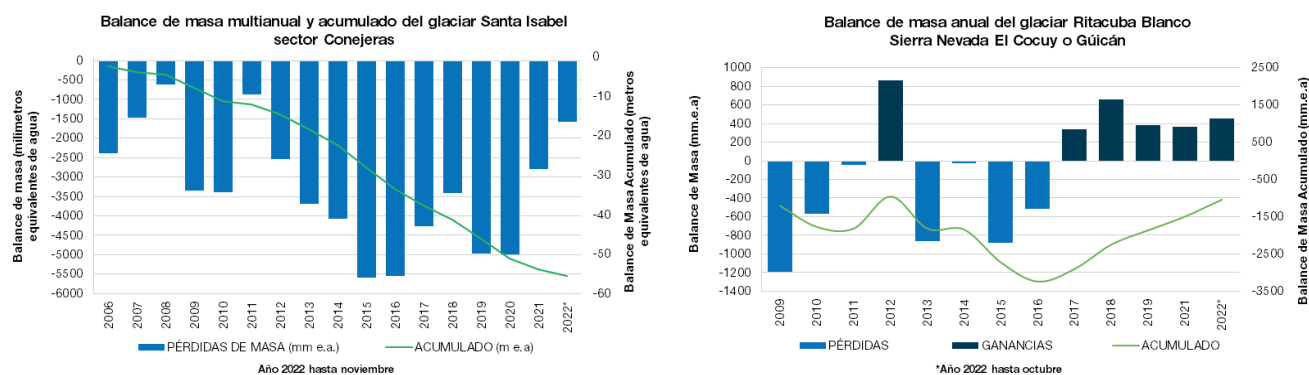


Figura 19. Balances de masa multianual del glaciar Santa Isabel, sector Conejeras (izq.) y de la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán, sector Ritacuba Blanco (der.).

De hecho, desde 2017 (excepto en 2020, cuando no fue posible realizar mediciones en terreno en este glaciar debido al aislamiento sanitario) se han evidenciado balances de masa anuales positivos, los cuales se podrían atribuir a condicionamientos geográficos y climáticos locales, tales como mayores altitudes de las masas glaciares y viento cargado de humedad provenientes de la cuenca del Orinoco que se condensa generando precipitaciones sólidas en las partes altas de la cordillera. Al respecto, no se cuenta con información del comportamiento climático en esta vertiente oriental de la cordillera Oriental.

Relaciones hídricas del sistema glaciar con los ecosistemas de la alta montaña

La alta montaña colombiana —con sus tres ecosistemas integrados: glaciar, páramo y bosque altoandino— resulta fundamental para el aporte de agua a la población. El agua de derretimiento glaciar no es un aporte significativo comparado con las cantidades que se originan, almacenan y drenan en el páramo y el bosque altoandino, además de la reducida cobertura glaciar respecto a los otros dos ecosistemas. En este sentido, y dado que es un sistema

integrado, es necesario comprender la dinámica del sistema hídrico de la alta montaña y sus interrelaciones, por lo menos cuantitativas, entre el glaciar, el páramo y el bosque altoandino, lo cual se arguye enseguida. Los aportes hídricos líquidos de los glaciares colombianos están directamente relacionados con las variaciones de área y volumen del hielo, que a su vez están influenciados por procesos atmosféricos como la dinámica de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y los fenómenos de variabilidad climática tipo ENSO.

Las redes hidrométricas del Ideam, localizadas en entornos de alta montaña, indican un predominio de aportes hídricos del bosque altoandino y del páramo, y en mucho menor cuantía del glaciar, el cual incrementa su contribución en temporadas secas debido al aumento de la fusión glaciar (por el incremento, a su vez, de la temperatura y la exposición a la radiación solar). Los caudales de fusión glaciar son objeto de reciente estudio. Un análisis de los datos de la estación hidrométrica en el borde del glaciar Santa Isabel, sector Conejeras (glaciar en próxima extinción), y que opera desde 2008, indica que su punto máximo de aporte líquido ocurrió durante el último

fenómeno climático extremo de El Niño en 2015 y 2016, intensificado por la ceniza volcánica acumulada sobre su superficie; después de este evento, el

aporte ha mostrado una tendencia a la disminución como respuesta a la fuerte reducción de área y volumen (Morán et al., 2018) (Figura 20).

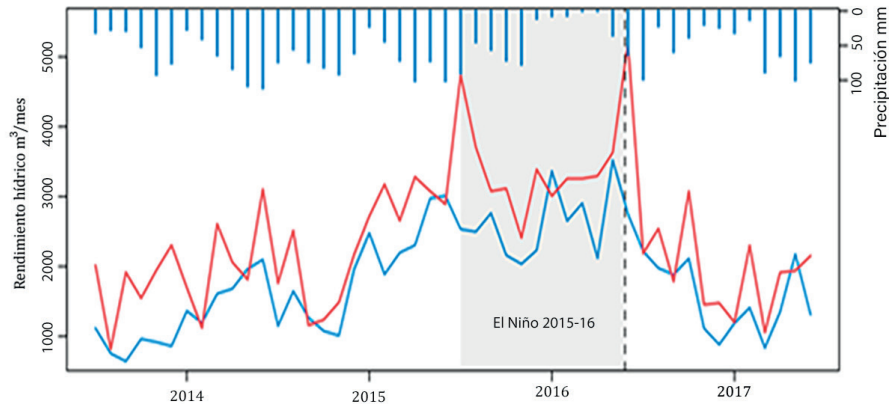


Figura 20. Rendimiento hídrico medio mensual (Q) para días con temperatura inferior a 2 °C (azul) y días con temperatura superior a 2 °C (rojo). Indicación del evento El Niño 2015-2016 (sombreado gris), punto de quiebre en evolución de la producción de agua (línea discontinua) y precipitación mensual (barras azules).

Fuente: (Morán et al., 2018). Datos de la estación hidrométrica Conejeras-2 Ideam, 4700 m.s.n.m.

Los aportes de agua líquida de un glaciar colombiano a la alta montaña son relativamente pocos, dada la baja cobertura de hielo en una cuenca de alta montaña, y se estiman entre 3 % a 5 % (Ideam, 2012). A pesar de que la red hidrométrica a gran altitud (>3000 m) no es densa en el territorio, se tienen dos redes especializadas localizadas alrededor del glaciar Santa Isabel y la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán como modelos de estudio. La Figura 21

muestra los aportes de los tres ecosistemas de la alta montaña en la cuenca del río Claro (área 71 km², Villamaría, Caldas), en la que se destacan tanto los caudales del bosque altoandino —cuenca sin ecosistema de páramo y área 0,92 km²— como los del páramo —sin cobertura glaciar y área 4,5 km²—, así como la influencia de los fenómenos de variabilidad climática tipo El Niño (2015-2016) y La Niña (2010-2011).

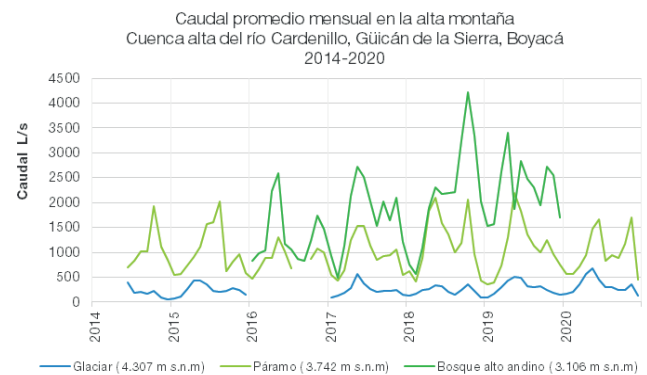
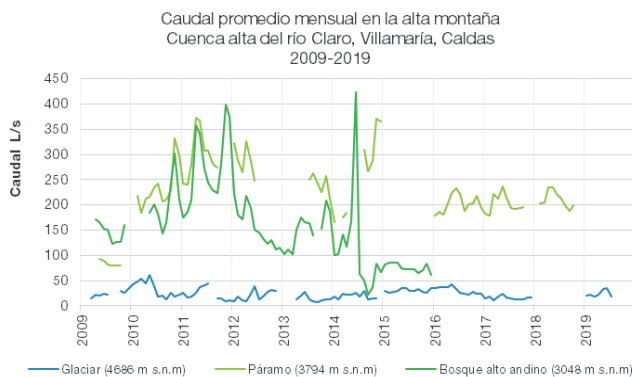


Figura 21. Caudal promedio en los ecosistemas de alta montaña. Casos cuenca Río Claro (izq.), río Cardenillo, Güicán de la Sierra, Boyacá (der.). El caudal de cada ecosistema incluye el (los) del ecosistema inmediatamente superior.

Fuente: Ideam.

Con base en la información de la Figura 21, es indudable que el suministro de agua líquida del sistema glaciar es poco comparado con lo que aportan el páramo y el bosque altoandino; pero esto no resta importancia en la dinámica en la alta montaña en cuanto a su naturaleza de indicador de cambio climático. Las figuras también expresan el relativo predominio de los aportes cuantitativos de agua del bosque altoandino sobre el páramo en razón al rango altitudinal del bosque que coincide con los frentes de condensación atmosférica que dan origen a mayores precipitaciones comparadas con el páramo. A su vez, esa diferenciación hídrica está condicionada por el relieve, las humedades y los suelos que regulan el flujo del agua. A pesar de que aquí se presentan tan solo dos casos de estudio, se vislumbra que, dada la complejidad biofísica de la alta montaña colombiana, su dinámica hídrica debe variar geográficamente.

4.6 Estado del conocimiento de las aguas subterráneas

En este componente se realiza una síntesis del estado actual del monitoreo a nivel nacional y regional, y se presentan los avances de redes de monitoreo implementadas por algunas autoridades ambientales regionales (corporaciones y autoridades ambientales urbanas). Además, se actualiza el inventario de puntos de aguas subterráneas y los usos y volúmenes del agua concesionada y captada a nivel nacional durante los años 2016 a 2021, a partir de los registros de la “tasa por utilización de agua” (TUA).

Es importante tener en cuenta que el conocimiento de las aguas subterráneas —que debe preceder a las actividades que se realizan en torno a su monitoreo, evaluación y gestión— se consolida e integra en el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) de los sistemas acuíferos. Este modelo MHC está integrado por: el modelo geológico, que describe la geometría de los sistemas acuíferos y su potencialidad de almacenamiento y flujo de las aguas subterráneas de acuerdo con las condiciones de porosidad, permeabilidad y continuidad de las unidades de roca sedimento; el modelo hidrológico, que determina la dinámica de flujo, los mecanismos y la cuantificación de recarga, inventario de puntos de agua, balance hídrico, conexiones hidráulicas de aguas superficia-

les y subterráneas; el *modelo hidráulico*, que permite reconocer las propiedades de permeabilidad o conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento de unidades acuíferas; el *modelo hidroquímico*, que permite reconocer el “fondo hidrogeoquímico” o distribución espaciotemporal de las propiedades fisicoquímicas y concentraciones de las especies químicas disueltas en el agua bajo condiciones naturales y su afectación por actividades antrópicas; y, finalmente, el *modelo isotópico*, que brinda información sobre fuentes, edades, tiempos de viaje y trayectos de flujo del agua subterránea. El MHC se debe alimentar de manera continua con el monitoreo permanente y sistemático de las aguas subterráneas que se realiza a través de pozos o piezómetros que facilitan el acceso a las unidades acuíferas en el subsuelo.

El monitoreo se constituye en herramienta esencial para conocer los procesos e interacciones del agua subterránea en el ciclo hidrológico. Los componentes estratégicos, programáticos, tecnológicos y financieros del monitoreo de agua subterráneas en los sistemas acuíferos de las áreas de jurisdicción de las autoridades ambientales deben estar incluidos en los programas institucionales regionales de monitoreo (Pirma), que son expresiones regionales del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH) y del Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB), derivados de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico expedida por el MADS en 2010.

Con el fin de conocer las características generales de los puntos de aguas subterráneas existentes (pozos profundos, aljibes, piezómetros, manantiales), se adelanta un inventario de estos puntos en el país. Según los lineamientos de los proyectos o los objetivos de las entidades que los realizan, se determinará el tipo de inventario que se debe realizar (nacional, regional o local). Un inventario adecuado se elabora mediante el uso del Formulario único nacional de inventario de puntos de agua subterránea (Funias), que es la herramienta de gestión diseñada por el SGC, el MADS y el Ideam para sistematizar los inventarios adelantados en los sistemas acuíferos de Colombia. El inventario debe dar cuenta de información general y específica sobre el punto en relación con su ubicación, identificación, propietarios del

predio, geología, geomorfología, características de construcción y diseño, características hidráulicas, condiciones de calidad, usos del agua, diagnóstico sanitario, registro de niveles, caudales y pruebas de bombeo, entre otras (Ideam, 2010).

Caracterización del estado actual del monitoreo de aguas subterráneas

Las redes regionales de monitoreo de aguas subterráneas en Colombia son operadas por las autoridades ambientales; estas, según lo estipulado en el artículo 9 del Decreto 1323 de 2007, están obligadas a "...realizar el monitoreo y seguimiento del recurso hídrico en el área de su jurisdicción, para lo cual deberán aplicar los protocolos y estándares establecidos en el SIRH".

Se obtuvo reporte de información de monitoreo de las autoridades ambientales AMVA, CAR, Carder, Carsucre, Corantioquia, Corpocaldas, Corpochivor,

Corpourabá, CRQ y CVC. Cabe resaltar que el monitoreo de aguas subterráneas es insuficiente o ausente en el resto de las autoridades ambientales.

La mayoría de las redes caracterizadas adelantan el monitoreo de variables de cantidad (niveles piezométricos) y calidad (físicoquímicas, microbiológicas e hidrogeoquímicas); además, solo AMVA y Corpochivor reportaron monitoreo de variables isotópicas (^{18}O y ^2H).

Los puntos de monitoreo de aguas subterráneas en las redes implementadas por las autoridades ambientales caracterizadas suman un total de 2.273 puntos de observación. Sobresalen la CVC y la CAR con el 67 % (1.012 puntos) y 49 % (750 puntos), respectivamente. Autoridades ambientales como Carder, Corpocaldas, Corpochivor y CRQ poseen una densidad menor a 50 puntos en sus redes, por lo que no se presentan en la gráfica (Figura 22).

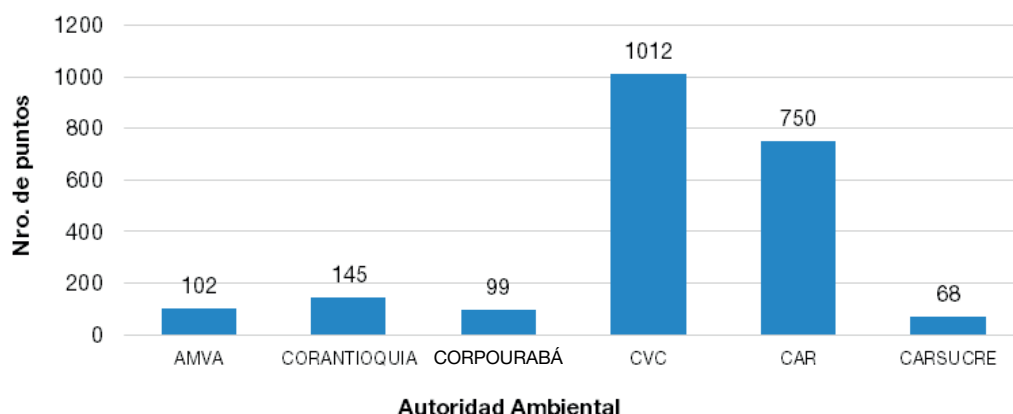


Figura 22. Cantidad de puntos monitoreados por la autoridad ambiental.

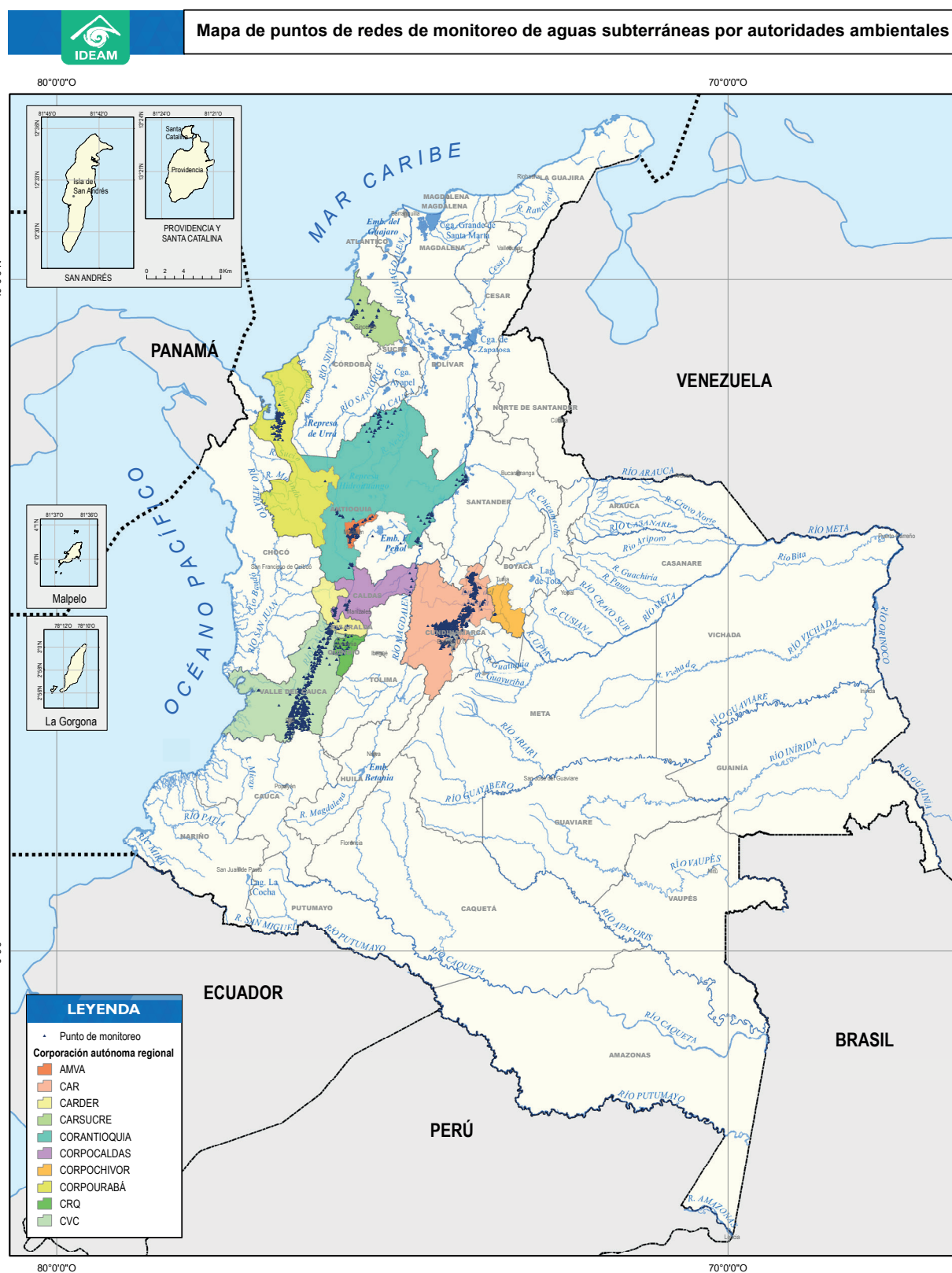
Fuente: Autoridades ambientales competentes.

En la Tabla 9, se presentan los parámetros que se monitorean a nivel regional por autoridad ambiental. Las que monitorean mayor cantidad de variables de calidad son Corpochivor, CVC, Corantioquia y Corpourabá.

Finalmente, en la Figura 23 se presenta el mapa que muestra las autoridades ambientales que reportaron que operaban redes de monitoreo de agua subterránea.

Tabla 9. Parámetros de calidad monitoreados por las autoridades ambientales

Autoridad/Parámetros	AMVA	Corpocaldas	Corporchivor	Corantoquia	CRQ	Corpourabá	CARDER	Carsucre	CAR	CVC
pH	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Nitratos	X	X	X	X		X	X	X		X
Dureza	X	X	X	X		X		X		X
Calcio	X	X	X	X		X	X	X		X
Magnesio		X	X	X		X	X	X		X
Sodio		X	X	X			X	X		X
Potasio		X	X	X		X	X	X		X
Sulfatos	X	X	X	X		X	X	X		X
Carbonatos			X	X		X		X		X
Bicarbonatos		X	X	X		X		X		X
Oxígeno disuelto (OD)	X	X	X	X	X	X			X	X
Sólidos disueltos totales (SDT)	X		X	X		X	X	X	X	X
Color	X		X	X			X	X		X
E. coli	X		X	X		X				
Hierro	X	X	X	X		X	X	X		X
Cobre	X		X	X			X			
Conductividad	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Coliformes	X		X	X		X	X	X		X
Manganeso	X					X	X			
Alcalinidad		X	X	X		X	X	X		X
Temperatura		X	X	X	X	X	X		X	X
Aluminio						X				X
Cloro		X	X							X
Pesticidas			X							



En términos generales, se resalta un monitoreo de las aguas subterráneas insuficiente, tanto en cantidad como en calidad. Este monitoreo no alcanza el 25 % de las autoridades ambientales y no cubre todos los sistemas acuíferos identificados en el país.

Actualización del inventario de puntos de agua subterránea a nivel nacional

El análisis de los reportes de las bases de datos enviados hasta la fecha por las autoridades ambientales, y la revisión y descargue de la información disponible en el SIRH y en otros documentos como PMAA y MHC, permitieron identificar leves aumentos en el número de puntos de aguas subterráneas en ocho autoridades ambientales (CAM, Cardique, Corpocaldas, Corpochivor, Corpomojana, DADMA, CDMB y CBS) con relación a reportes de anteriores ENA. A la fecha se han contabilizado un total de 68.397 puntos de agua subterránea en el país,

lo que representa un aumento aproximado de 6,5 % respecto al ENA 2018 y de 35,5 % con relación al ENA 2014.

En el consolidado hay 68.397 puntos de agua reportados por las autoridades ambientales, de los cuales 17.007 son pozos (el 44 % en jurisdicción de la CAR y CVC), 38.817 aljibes y 4.384 manantiales. En el inventario solo se encuentran reportados 181 piezómetros y 6.698 puntos no tienen información. Con relación a la clasificación por tipo de punto, la Figura 24 muestra gráficamente los resultados obtenidos.

Los resultados de la clasificación por condición de los puntos muestran que no se cuenta con información para el 53,3 % de estos. El 46,7 % restante está representado principalmente por puntos en estado productivo que corresponden al 29 % y el resto están abandonados o inactivos.

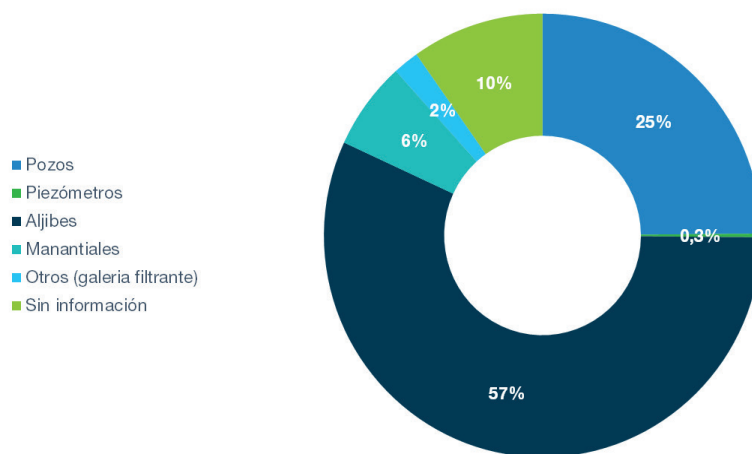


Figura 24. Resultados de clasificación por tipo de puntos de agua subterránea.

El inventario sigue siendo insuficiente y lleva a concluir que el país desconoce los dominios de aprovechamiento del agua subterránea en Colombia.

Volúmenes y usos concesionados y captados de aguas subterráneas a nivel nacional

En la Tabla 10 se presentan los resultados de los cálculos de volúmenes concesionados y captados

en m³/año y sujetos al cobro de la TUA. En el periodo del 2016 al 2021, se observa una diferencia considerable entre los volúmenes concesionados y captados, ya que estos últimos representan solo el 46 % del volumen concesionado. Ante este escenario, es importante mencionar que para este periodo estudiado se presentan vacíos de información, debido a que solo 23 de las 38 autoridades ambientales analizadas (es decir, el 60 %) reportaron los volúmenes concesionados y captados de sus usuarios.

Esta situación fue más crítica para el periodo 2020 y 2021, en los que solo 7 entidades (18 %) reportaron la información.

Nota: la información aportada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) fue entregada directamente por esta autoridad ambiental al Ideam y solo se reportaron los datos de volúmenes concesionados.

Tabla 10. Volúmenes concesionados y captados (2016-2021).

Año	Concesionado m³/año	Captado m³/año
2016	735.806.759	117.657.582
2017	713.539.655	230.745.620
2018	1.134.545.777	257.030.781
2019	955.136.817	102.943.862
2020	950.585.597	43.562.435
2021	775.782.574	54.920.410
Total en m³	5.265.397.181	806.860.690

Fuente: Bases de datos MADS y CVC, 2022.

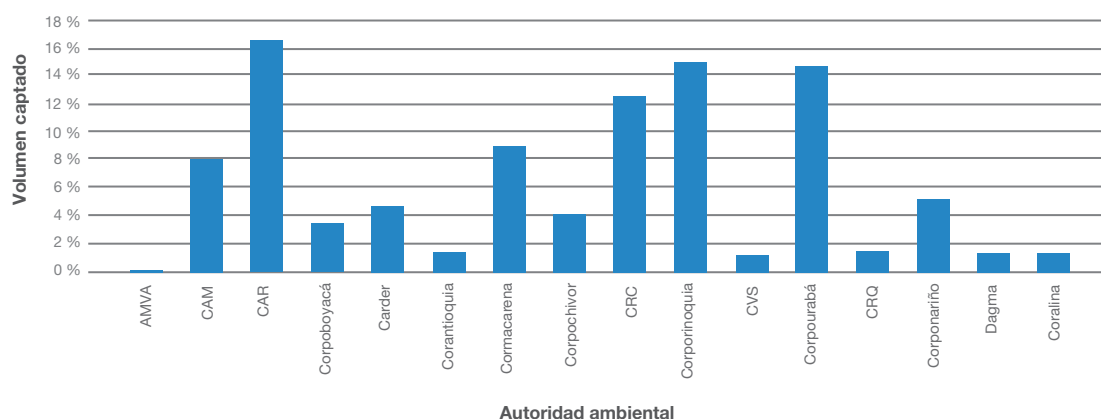


Figura 25. Volúmenes captados en m³ por autoridades ambientales en el periodo 2016-2021.

Fuente: Base datos MADS, 2022.

Usos reportados de agua subterránea en Colombia

La Tabla 11 muestra que los usos de mayor importancia en el volumen concesionado son el agrícola

La CVC abarca la mayor cantidad de volúmenes concesionados a sus usuarios con un porcentaje cercano al 70 % del total nacional. Otras autoridades —CRC, Corpourabá, CVS, Cormacarena, CAR y Corporinoquia— suman cerca del 30 %. Por otro lado, Corpocaldas, Corpoguavio, Cardique, CDMB, AMVA, CDA, Corponariño, Cornare, Dagma y CRQ representan las autoridades ambientales con menores volúmenes concesionados, con valores inferiores al 1 %.

En la Figura 25, se muestran graficados los porcentajes de los volúmenes captados en m³ para cada autoridad ambiental (exceptuando la CVC, que no reportó información) en el periodo 2016-2021. Como se observa, resaltan la CAR, Corporinoquia, Corpourabá, CRC y Cormacarena como las autoridades con mayores volúmenes captados por sus usuarios, alrededor de un 67 % del total. Por otro lado, Corpocaldas, Corpoguavio, Cornare, CDMB, Cardique, AMVA, y CDA representan las autoridades ambientales con menores volúmenes captados, con valores inferiores al 1 %.

(71 %), el doméstico (10 %) y el industrial (13 %). Estos tres sectores abarcan el 94 % del total del volumen concesionado. Los sectores pecuario, agropecuario, piscícola, recreativo y otros representan cerca del 6 %.

Tabla 11. Volumen (m³) concesionado por usos (2016-2021).

Año/usos	Agrícola	Consumo doméstico	Industrial	Pecuario, agropecuario, piscícola	Recreativo	Otros
2016	551.229.807	75.523.346	48.0560.639	5.677.766	98.910	55.220.291
2017	393.219.856	141.090.815	95.035.475	8.323.465	200.144	75.634.201
2018	788.729.237	124.683.624	148.117.477	4.940.159	2.649.177	65.410.923
2019	666.456.221	83.951.309	162.944.167	3.321.746	590.078	37.856.717
2020	704.950.582	44.347.481	146.175.344	1.177.257	20.555	53.914.352
2021	354.588.204	72.277.735	75.614.304	2.706.522	79.927	2.951.751
Total	3.729.173.910	541.874.314	675.943.406	23.711.044	3.638.791	290.988.236
% usos del total concesionado	70,8 %	10,2 %	12,8 %	0,5 %	0,07 %	5,5 %

Fuente: Bases datos de MADS y CVC, 2022.

En la Tabla 12, se observa que el uso agrícola (25,8 %), el doméstico (42,1 %) y el industrial (20,1 %) representan cerca del 88 % del volumen captado. Sectores como el pecuario, agropecuario, piscícola, recreativo y otros representan alrededor de un 12 %.

Es necesario mejorar el reporte oportuno de las autoridades ambientales para contar con información precisa y coherente de volúmenes concesionados y captados de aguas subterráneas.

Tabla 12. Volumen (m³) captado por usos (2016-2021).

Años/usos	Agrícola	Consumo doméstico	Industrial	Pecuario, agropecuario piscícola	Recreativo	Otros
2016	6.592.285	69.254.767	194.587.46	4.626.785	80.248	17.644.753
2017	40.396.770	107.412.771	55.905.289	7.876.925	200.144	18.918.023
2018	78.615.301	95.605.847	58.311.374	3.990.454	2.646.895	17.855.784
2019	66.076.702	18.735.418	80.716.62	1.420.335	20.549	8.651.073
2020	15.499.056	17.282.925	1.065.841	1.177.503	20.555	8.516.531
2021	588.204	31.607.582	19.500.602	265.561	753.78	2.883.082
Total	207.768.319	339.867.433	162.313.514	19.357.562	3.043.769	74.469.244
% usos del total captado	25,8 %	42,1 %	20,1 %	2,4 %	0,4 %	9,2 %

Fuente: Base datos MADS, 2022.

Actualización de las fichas de sistemas acuíferos y avances de estudios nacionales 2018-2022

De los 65 sistemas acuíferos presentados en el ENA 2018, se actualizó la información publicada de los sistemas acuíferos que se muestran en la Tabla 13, cuyas fichas se presentan en el Anexo 7 del ENA 2022.

Además, se incorporaron dos nuevas fichas correspondientes a los sistemas acuíferos de Súnuba SAM 4.11 y río Risaralda SAM 6.9. También se presenta el mapa actualizado de sistemas acuíferos de Colombia (Figura 26), en el que aparecen los 67 sistemas acuíferos identificados en el país hasta la fecha.

Los avances de las entidades nacionales sobre el estado del conocimiento de las aguas subterráneas

en Colombia entre 2018 y 2022 se sintetiza en los siguientes contenidos que publicó el SGC:

- “Generación de conocimiento hidrogeológico que permita establecer la ocurrencia, origen y conexión entre los flujos de agua subterránea de la cuenca alta de las quebradas La Baja y Angostura con el Páramo de Santurbán mediante técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas” (Servicio Geológico Colombiano, 2022). En esta versión, disponible en el Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG), se presenta la versión del año 2022, con anexos de resultados de análisis físicoquímicos, hidrogeoquímicos e isotópicos.
- “Modelo Hidrogeológico Conceptual Valle Medio del Magdalena Planchas 108 y 119 Puerto Wilches, Barrancabermeja, Sabana de Torres y San Vicente de Chucurí” (Cañas et al., 2019).

Tabla 13. Fichas de sistemas acuíferos actualizadas.

Acuífero	Nombre	Actualización
SAM 6.4	Santa Fe de Antioquia	Red de monitoreo
SAM 1.1	Valle Medio del Magdalena	Red de monitoreo
		Tipo de agua
		Inventario de puntos
SAM 6.3	Valle de Aburrá	Red de monitoreo
SAM 6.5	Bajo Cauca antioqueño	Red de monitoreo
SAM 6.2	Santágueda	Red de monitoreo
		Inventario de puntos
SAM 5.1	Golfo de Urabá	Red de monitoreo
SAM 6.6	La Pintada-Valparaíso	Red de monitoreo
SAM 6.1	Glacis del Quindío	Red de monitoreo
		Inventario de puntos
SAC 2.2	La Mojana	Inventario de puntos
SAC 1.4	Turbaco	Inventario de puntos
SAM 1.2	Mariquita-Dorado-Salgar	Red de monitoreo

Fuente: Autoridades ambientales competentes.

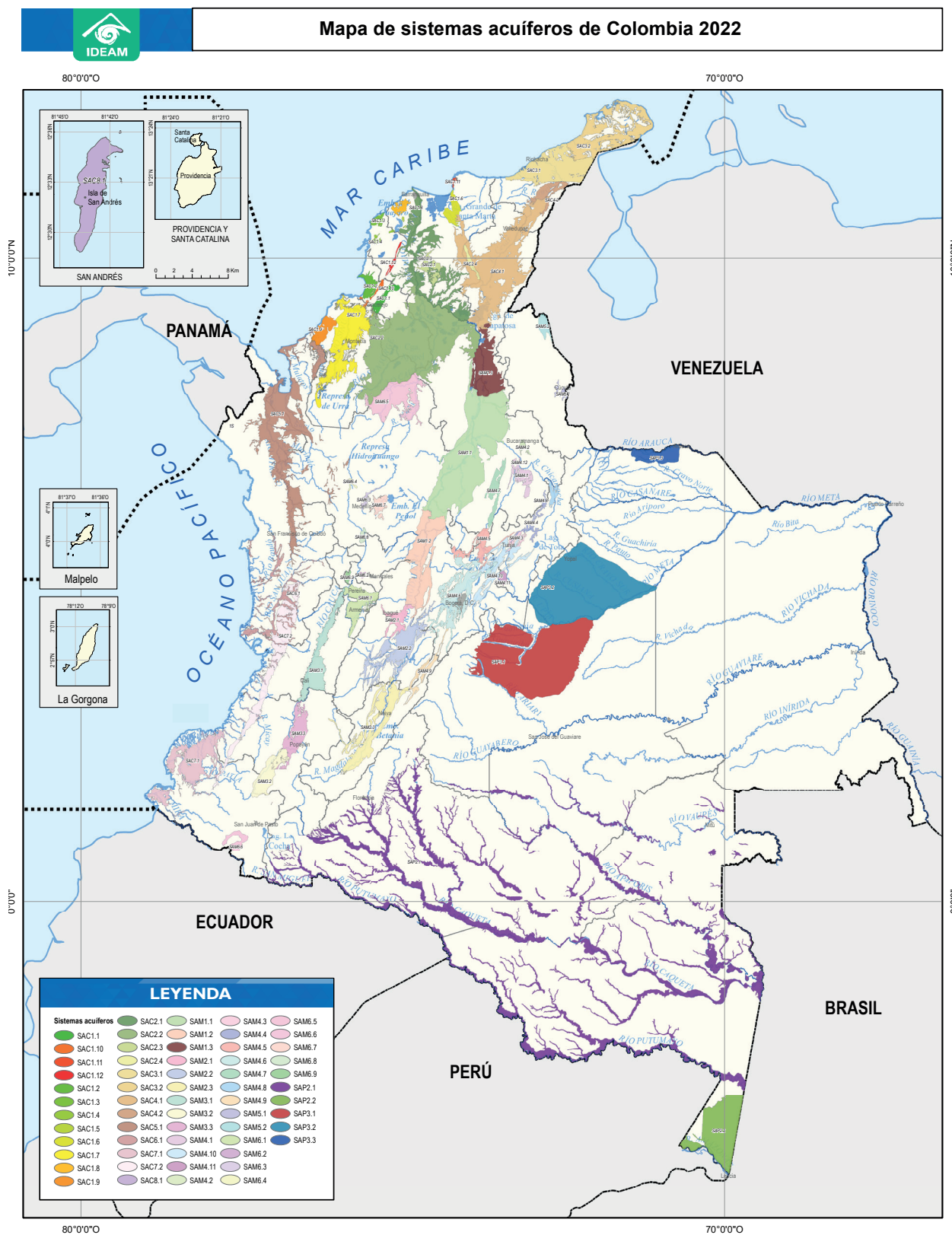


Figura 26. Mapa de los sistemas acuíferos de Colombia, 2022.

Basado en lo anterior, el país tiene la necesidad de acelerar las estrategias para mejorar la información y conocimiento sobre aguas subterráneas en Colombia con acciones de articulación institucional para construir modelos hidrogeológicos conceptuales (MHC) de los sistemas acuíferos identificados. También es preciso contar con un monitoreo de aguas subterráneas (diseñar e implementar redes de monitoreo) enmarcado en los programas institucionales regionales de monitoreo del agua (Pirma) a cargo de las autoridades ambientales, que son las responsables del monitoreo regional del agua y del recurso hídrico en las áreas de su jurisdicción.

5. ¿Cuál es el comportamiento de los sedimentos en Colombia?

Los sedimentos son material removido de la superficie terrestre por parte de algunos agentes, como el agua y el viento, y constituyen un factor clave en la

formación de paisajes a largo plazo (Hinderer, 2012). Cuando el agente erosivo es el agua, dependiendo de las características tanto del sedimento como de la superficie, este puede depositarse en la ladera o alcanzar el cauce. Los sedimentos que alcancen el cauce podrán transportarse o no, de acuerdo con las características del material y del cauce. Con el fin de analizar la dinámica de sedimentos en el territorio colombiano, se consideran los procesos del ciclo de sedimentos: de producción, de entrega al cauce, y el transporte y el depósito dentro de la red de drenaje, procesos descritos por diferentes autores (Fu et al., 2019).

En este análisis, la principal fuente de producción de sedimentos es la erosión hídrica potencial; en ladera se considera la producción; y en cauce, el transporte y depósito de sedimentos, teniendo en cuenta la conectividad de cada elemento de ladera con el cauce. Se calcula el rendimiento de sedimentos a partir de los datos observados y del balance de sedimentos.

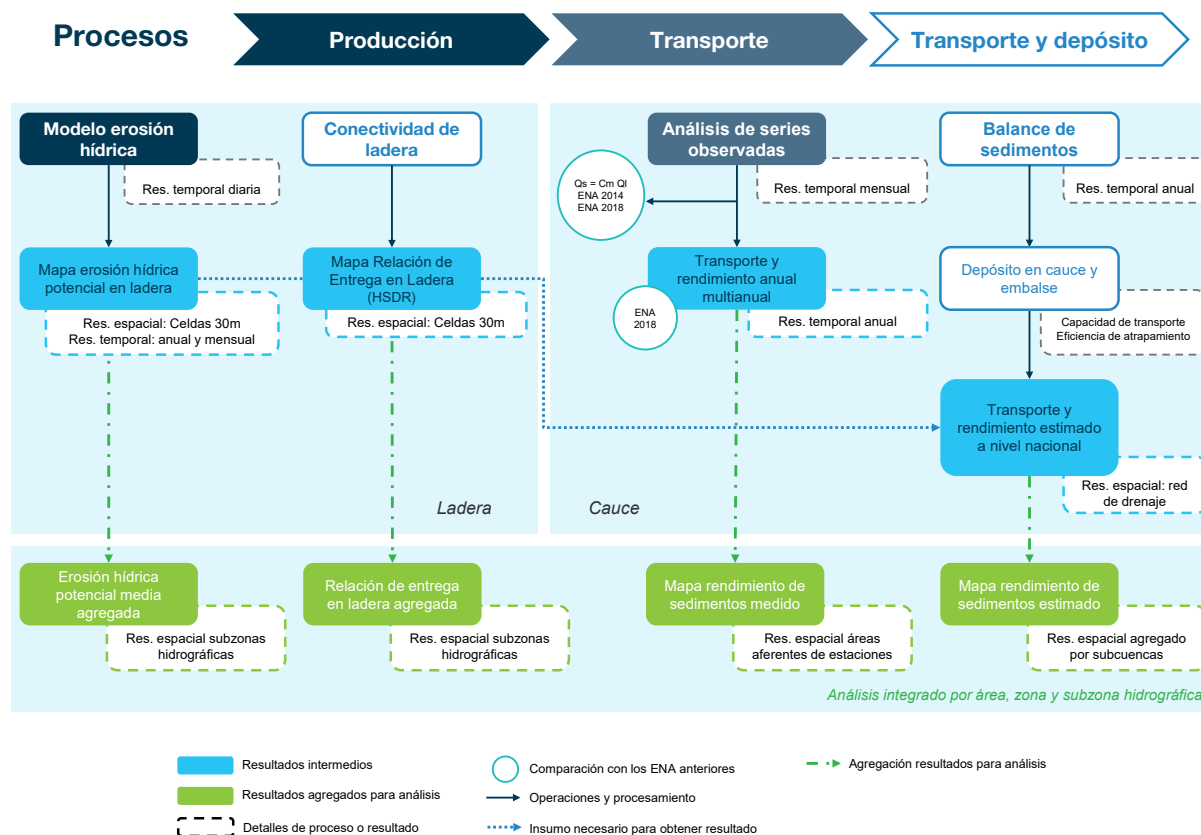


Figura 27. Esquema marco metodológico y conceptual.

En el capítulo de sedimentos del Estudio Nacional del Agua, se considera un horizonte de análisis de 1 a 50 años, de acuerdo con la disponibilidad de la información. En este horizonte de análisis, los agentes que controlan los procesos son: el clima a corto plazo, el uso y las coberturas del suelo, y los posibles impactos de la actividad antrópica.

La Figura 27 presenta de manera esquemática el marco conceptual y metodológico, en donde los procesos se discretizan teniendo en cuenta el lugar de la cuenca donde ocurren, en ladera o en cauce, y el tipo de proceso que representan: producción, transporte o depósito.

Considerando el marco conceptual y metodológico, se definen las fuentes de información requeridas, las cuales están disponibles para todo el territorio nacional. En el ENA 2022 se describen tanto la fuente de la cual fue obtenida la información como la escala o resolución que tiene y en qué proceso específico es usada como insumo para el análisis: para el modelo de erosión hídrica, la conectividad de ladera o el balance de sedimentos.

Los procesos en ladera están asociados con el potencial erosivo de la escorrentía superficial, el rango de pendientes de la topografía, la erodabilidad del suelo, la cobertura y las prácticas de manejo. Con estos parámetros se estiman variables de erosión potencial hídrica y la conectividad de cada elemento de la ladera con el cauce. Esta conectividad se manifiesta en las tasas de transporte de agua y sedimentos. Los resultados del índice de conectividad se regionalizan con la *Relación de entrega en ladera* (HSDR).

Los procesos en cauce dan cuenta del rendimiento de sedimentos obtenido a partir del transporte de sedimentos, calculado a partir de aforos realizados en las estaciones de la Red de Referencia Nacional del Ideam. Con estos conceptos es posible evaluar

la capacidad de transporte y el balance de sedimentos por tramos. De esta manera, se determinan la producción de sedimentos y las condiciones de depósito para generar finalmente el mapa de rendimientos estimado a nivel nacional.

Análisis a nivel nacional de la dinámica de sedimentos en ladera y en cauce

Se muestra una síntesis del resultado del análisis de los procesos del ciclo de sedimentos a nivel nacional: producción, transporte y depósito.

Erosión hídrica potencial

En el ENA 2022, los resultados de erosión hídrica potencial diaria se agregan de manera mensual promedio multianual y, espacialmente, se muestra su distribución en celdas de 30 metros y agregados por subzonas hidrográficas. Se conservan los rangos de valores anuales presentados en el ENA 2018 y se agregan rangos de valores mensuales.

Los resultados agregados por subzona hidrográfica (surgidos a partir de medias zonales) de la erosión hídrica potencial medio mensual se presentan en la Figura 28; en dicha figura se evidencian tres subzonas con erosión hídrica potencial muy severa los 12 meses del año: dos en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, río Salado y otros directos al Cauca y río Timba; y una en el área hidrográfica Pacífico, río San Juan del Micay.

La Figura 29 (izq.) muestra la variabilidad anual promedio multianual de la erosión hídrica potencial presentando el número de subzonas hidrográficas en cada uno de los rangos adoptados. En dicha gráfica, se evidencia que los meses con mayor erosión hídrica potencial en el ámbito nacional son junio, julio, agosto, octubre y noviembre, mientras que los meses con menor erosión hídrica potencial son febrero, marzo y septiembre.

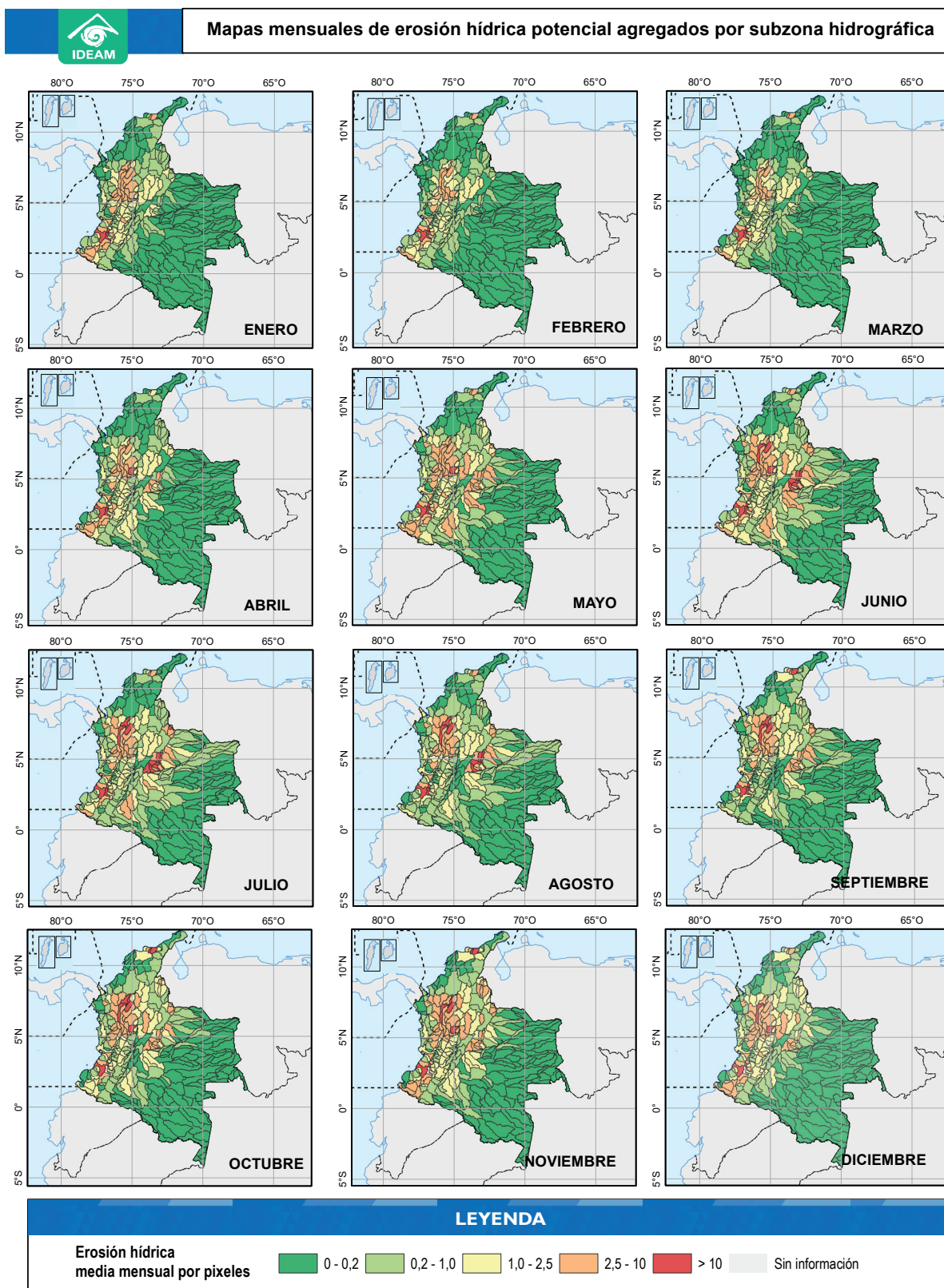


Figura 28. Mapas mensuales de erosión hídrica potenciales agregados por subzona hidrográfica.

Al sumar los valores medios de erosión hídrica potencial mensual, se obtiene el mapa de erosión hídrica potencial media anual multianual; en la agregación se tiene en cuenta el valor medio de erosión en cada subzona hidrográfica. En la Figura 29 (der.) se evidencian seis subzonas con erosión hídrica potencial

muy severa: cinco localizadas en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, río Salado y otros directos al Cauca, río Timba, río La Miel (Samaná), directos al río Cauca entre río San Juan y Puerto Valdivia y Alto Nechí; y una subzona localizada en el área hidrográfica Pacífico, río San Juan del Micay.

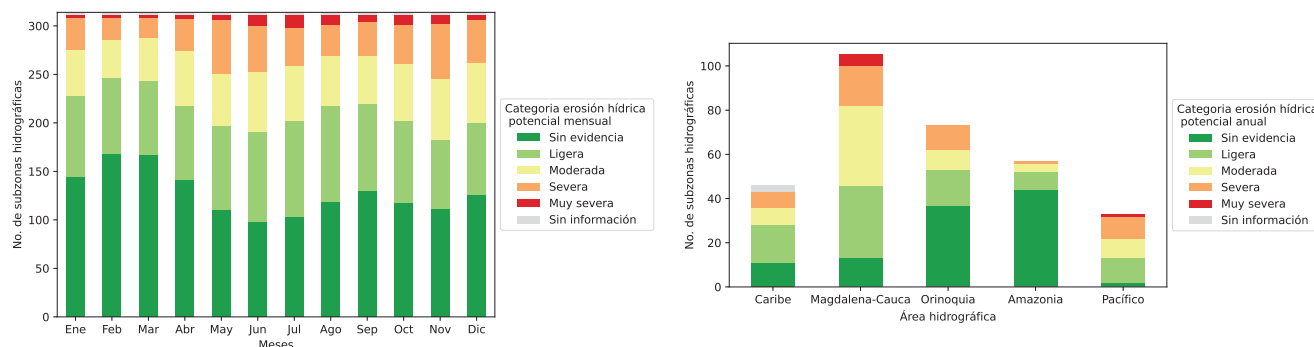


Figura 29. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial (izq.) y número de subzonas según categoría de erosión hídrica potencial por área hidrográfica (der.).

Los resultados de la erosión hídrica potencial por área hidrográfica (Figura 29, der.) muestran que las subzonas con erosión hídrica severa y muy severa se localizan principalmente en la parte alta del Magdalena-Cauca y en zonas de piedemonte localizadas en las áreas Caribe, Orinoco, Amazonas y Pacífico. Por otra parte, la erosión ligera y muy ligera es predominante en zonas bajas del Magdalena-Cauca y en las zonas planas de la Orinoquía y la Amazonía. En el caso del Pacífico, más de la mitad de las subzonas tienen erosión moderada, severa o muy severa. En el Anexo 5 se presenta cada subzona con el rango de erosión anual y mensual.

Relación de entrega en ladera

La Figura 30 (izq.) muestra los resultados de la relación de entrega en ladera a nivel nacional por subzonas hidrográficas. Los valores mayores representan

una mayor probabilidad de que el material producido en esa área llegue a cauce o a una zona de depósito aguas abajo.

En las áreas Caribe y Pacífico se encuentran más subzonas con una muy alta conectividad; y, en las áreas Caribe y Amazonía, ninguna subzona registra relación de entrega en ladera muy alta (Figura 30, der.). En general, se observa que en zonas con pendientes altas y medias se tiene una relación de entrega alta, mientras que en zonas planas se presentan valores bajos. En la zona alta y media del Magdalena-Cauca, así como en los piedemontes, se presentan relaciones de entrega alta o muy alta, mientras que, en zonas de baja pendiente, como las llanuras de la Orinoquía y la Amazonía, se presentan relaciones de entrega predominantemente bajas y muy bajas. En el Anexo 5, se muestra cada subzona con el valor y el rango de relación de entrega en ladera.

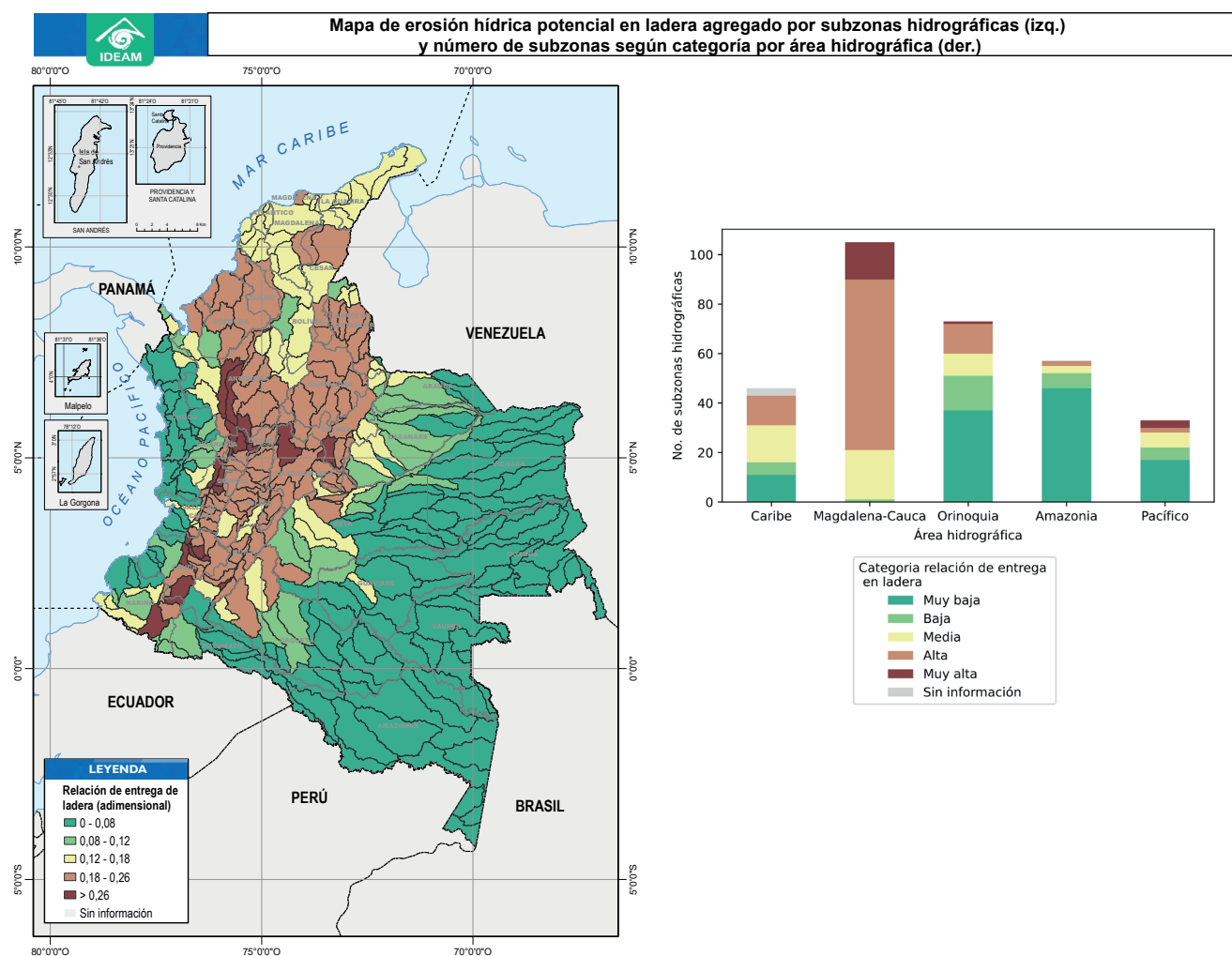


Figura 30. Mapa de erosión hídrica potencial en ladera agregado por subzonas hidrográficas (izq.) y número de subzonas según categoría por área hidrográfica (der.).

Rendimiento de sedimentos

En el ENA 2022, se analizan los rendimientos de sedimentos estimados a partir de datos observados (Figura 31, izq.) y de balance de largo plazo (Figura 31, der.).

En las áreas hidrográficas Caribe, Orinoquia, Amazonía y Pacífico hay zonas sin información dado que no se tienen registros de transporte de sedimentos para estimar rendimientos. En el Anexo 5c se presenta la tabla con la información correspondiente de cada estación analizada.

El análisis de balance de sedimentos representa la conectividad en el territorio; por ello, para agregar sus resultados se debe tener en cuenta la configuración topológica de la red de drenaje.

Análisis de la dinámica de sedimentos por área hidrográfica

En el ENA 2022 se presentan los análisis que integran los resultados del rendimiento de sedimentos (medido en estaciones y estimado con balance), con la relación de entrega en ladera y la producción de sedimentos estimada con erosión hídrica

potencial para cada área hidrográfica. En las zonas y subzonas hidrográficas con datos medidos de rendimiento de sedimentos se determinan las posibles causas de estos valores.

Los departamentos en donde se identifica una mayor área con erosión hídrica potencial severa y muy severa son: Antioquia, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Caldas, Risaralda, Chocó, Tolima, Cauca y Nariño. Asimismo, en las zonas de piedemonte de los departamentos de Caquetá, Meta y Casanare, se presenta erosión hídrica potencial entre moderada y severa, al igual que en las vertientes de la Sierra Nevada de Santa Marta, en los departamentos de La Guajira y Magdalena. La relación de entrega en ladera es mayor en las subzonas localizadas en las vertientes de los ramales de la cordi-

llera de los Andes y en la serranía del Perijá. Siendo así, el material erosionado en ellas tiene una alta probabilidad de transportarse al cauce o depósito más cercano, por lo que se afectarían las condiciones del recurso hídrico.

Las zonas identificadas con erosión severa, rendimientos altos de sedimentos y mayor entrega en ladera coinciden en la mayoría de los casos con las evidencias presentadas en el “Mapa de degradación de suelos por erosión” (Ideam y UDCA, 2015) y en la zonificación de amenazas por movimiento en masa del SIMMA (2022).

A continuación, se muestra la síntesis de resultados por área hidrográfica producto de los análisis de erosión hídrica potencial, relación de entrega en ladera y rendimiento de sedimentos.

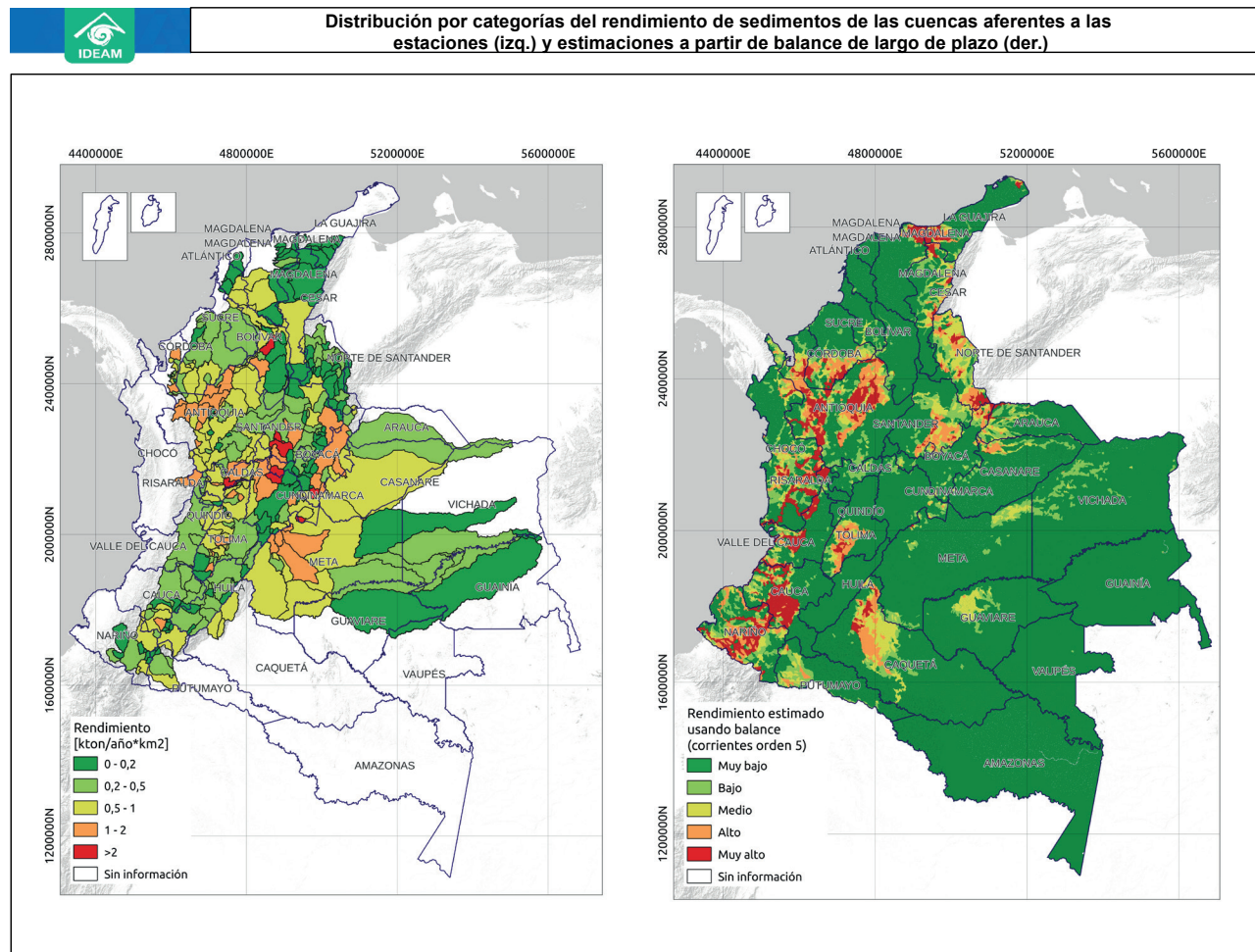


Figura 31. Distribución por categorías del rendimiento de sedimentos de las cuencas aferentes a las estaciones (izq.) y estimaciones a partir de balance de largo plazo (der.).

Área hidrográfica Caribe

En el área hidrográfica Caribe, se presenta erosión hídrica potencial severa y muy severa en las zonas Atrato Darién y Caribe Guajira. En la zona Caribe Guajira, se resaltan las subzonas río Ancho y otros directos al Caribe y río Don Diego, en donde se presenta erosión muy severa en al menos un mes. Los meses de febrero y marzo presentan una menor erosión, mientras que octubre y noviembre presentan mayor erosión. En las zonas Caribe litoral, Sinú y Catatumbo se presenta erosión moderada, ligera y sin evidencia; en el caso del Catatumbo, predomina la erosión moderada; mientras que en el Caribe litoral predominan las subzonas sin evidencia de erosión. Las subzonas identificadas con erosión severa se localizan en la vertiente norte de la Sierra Nevada de Santa Marta y en la zona noroccidental de la cordillera Occidental.

En relación con altos valores de rendimiento de sedimento; estos se localizan en Atrato Darién y en Caribe litoral. En los resultados de rendimiento estimados por balance de largo plazo se identifican mayores áreas con rendimientos altos y muy altos en las zonas Atrato Darién y Catatumbo, y en las subzonas río Pamplonita y río Zulia en la parte alta de las cuencas.

Área hidrográfica Magdalena-Cauca

En el área hidrográfica Magdalena-Cauca, se presenta erosión hídrica potencial muy severa en las zonas Saldaña, Medio Magdalena, Cauca y Nechí. Los meses de febrero, marzo, agosto y septiembre presentan una menor erosión, mientras que mayo, junio, octubre y noviembre presentan mayor erosión. En las zonas del Alto Magdalena, Cesar y Bajo Magdalena predomina la erosión hídrica potencial ligera y sin evidencia, mientras que en las zonas de Sogamoso y Bajo Magdalena-Cauca y San Jorge se presenta erosión moderada y ligera.

Las subzonas identificadas con erosión muy severa o severa se localizan más que todo en la vertiente oriental de la cordillera Occidental, vertiente occidental de la cordillera Central y vertiente occidental de cordillera Oriental.

En términos de relación de entrega en ladera, el área Magdalena-Cauca en general presenta valores altos y muy altos, los cuales están relacionados con la zona montañosa predominante en el área. Las zonas donde se presenta erosión hídrica potencial muy severa y severa coinciden con valores de conectividad altos y muy altos.

Los rendimientos altos y muy altos se identifican en 20 estaciones que se localizan en Saldaña, Alto Magdalena, Medio Magdalena, Sogamoso y Cauca. Los resultados de rendimiento estimados por balance de largo plazo muestran valores de rendimientos altos y muy altos en las zonas de Cauca, y Alto y Medio Magdalena. Se resalta la subzona Carare Minero donde se tienen rendimientos altos y muy altos en las cuatro estaciones localizadas en esta zona.

Área hidrográfica Orinoquía

En el área hidrográfica de la Orinoquía, se presenta erosión hídrica potencial severa en las zonas de Meta y Arauca. Los meses de febrero y marzo muestran una menor erosión, mientras que junio y julio evidencian mayor erosión. La zona Meta tiene erosión muy severa en al menos un mes en seis subzonas y la zona Arauca presenta erosión muy severa en al menos un mes en una de sus subzonas. Las subzonas identificadas con erosión muy severa o severa se localizan, principalmente, en la zona de piedemonte, lo cual se refleja también en los rendimientos altos y muy altos en la parte de alta de las zonas Meta y Guaviare donde se tiene una alta producción de sedimentos por erosión hídrica potencial, así como una relación de entrega en ladera alta.

En las zonas de Inírida, Guaviare, Vichada, Tomo, Casanare, Orinoco directos y Apure predomina la erosión hídrica potencial sin evidencia; en el caso de Guaviare, algunas de sus subzonas presentan erosión moderada. En la parte oriental del área de la Orinoquía se cuenta con baja densidad de estaciones de monitoreo; al realizar el balance de sedimentos propuesto se encuentran valores de rendimiento bajos y muy bajos. Sin embargo, en la parte alta de las zonas Inírida y Vichada se estiman rendimientos medios.

Área hidrográfica Amazonía

En el área hidrográfica Amazonía, se presenta erosión hídrica potencial moderada y severa en al menos un mes en las zonas de Caquetá, Caguán y Napo. Los meses de enero y febrero presentan una menor erosión, mientras que junio y julio hay mayor erosión. Las subzonas identificadas con erosión severa y moderada se localizan, principalmente, en la franja de piedemonte.

En términos de relación de entrega en ladera se tienen valores medios y altos en la zona de piedemonte localizada en las zonas Vaupés, Caquetá y Caguán, coherente con los valores de erosión hídrica potencial y con los rendimientos de sedimentos estimados de balance de largo plazo.

Área hidrográfica Pacífico

En el área hidrográfica Pacífico, se presenta erosión hídrica potencial muy severa y severa, en al menos un mes, en las zonas de Mira, Patía, Tapaje Dagua directos y San Juan. Las subzonas con erosión muy severa y severa se localizan sobre todo en la vertiente occidental de la cordillera Occidental. Los meses de febrero, marzo, agosto y septiembre presentan una menor erosión, mientras que en abril, mayo, noviembre y diciembre se evidencia una mayor erosión.

Los rendimientos de sedimentos altos, acorde con las estaciones de monitoreo y el balance de largo plazo, se identifican en las zonas Patía, San Juan y Tapaje Dagua directos, en donde predomina la cobertura de suelos con fines agrícolas; también es una zona que se caracteriza por una alta magnitud de la precipitación.

6. ¿Cuál es la importancia de la hidrología isotópica en Colombia?

La *hidrología isotópica* es la rama de la ciencia que utiliza herramientas isotópicas y técnicas nucleares para el estudio del ciclo del agua (Aggarwal et al., 2005). Sus orígenes se remontan a finales de la década de los 40 y comienzos de los años 50 del sigloXX, cuando muchos científicos involucrados en el desarrollo de la ciencia nuclear regresaron a

la vida civil una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial. Los isótopos estables y radiactivos pueden ser utilizados como trazadores naturales para comprender el origen y la evolución del agua a través de todos los compartimentos del ciclo hidrológico. En tal sentido, son un complemento ideal para otras ramas de la ciencia, como la hidroquímica.

La hidrología isotópica implica determinar la composición isotópica de la lluvia y de los ríos, lagos, humedales, manantiales y pozos para luego interpretar sus diferencias en términos de tiempos de residencia del agua interacciones entre aguas superficiales y subterráneas, condiciones climáticas, y reacciones biológicas y químicas. Las técnicas isotópicas ayudan a identificar los procesos que gobiernan la calidad del agua y proveen información para administrar y proteger los recursos hídricos.

En Colombia, los primeros estudios de hidrología isotópica datan de mediados de la década de 1970. La aplicación de herramientas isotópicas para resolver preguntas como ¿dónde se recargan los acuíferos? ha contado con la ayuda de programas de cooperación técnica internacional, en donde se destaca los buenos oficios del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

La mayoría de los estudios hidrológicos isotópicos llevados a cabo en nuestro país en los años 80 y 90 del siglo pasado se enfocaron en pocos entes; sobresalen los extintos Instituto de Asuntos Nucleares (IAN), Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (Inea), y el Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras o Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (Ingeominas), predecesores del hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC). Desde inicios del presente siglo, una mayor variedad de entidades colombianas ha incorporado en su agenda de trabajo las técnicas nucleares aplicadas a hidrología, entre ellas, algunas corporaciones autónomas regionales y la academia.

En los últimos ocho años han ocurrido tres hechos que están motivando el uso de las técnicas isotópicas en Colombia: (1) la implementación de la Red Nacional de Isotopía (RNI), operada por el Ideam con el concurso de otras instituciones colombianas; (2) la incorporación de las técnicas isotópicas en los

estudios de impacto ambiental en el marco de solicitudes de licenciamiento ambiental para proyectos mineros, promulgada por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (Anla); y (3) el fortalecimiento del Laboratorio de Análisis de Isótopos Estables en Agua Líquida (LAIE) del SGC.

La Figura 32 y la Tabla 14 presentan un inventario no exhaustivo de proyectos de hidrología isotópica ejecutados en Colombia. En el listado no se incluyen proyectos en geotermia ni proyectos dirigidos a

evaluar amenazas por volcanismo. Las etiquetas en el mapa coinciden con los números de la primera columna de la tabla. En la penúltima columna, se indica el énfasis en el estudio aunque en general los estudios de hidrología isotópica deben considerar varios compartimentos del ciclo hidrológico. La Figura 32 también muestra la ubicación de las estaciones activas de la red RNI, así como estaciones activas de la Red Mundial de Isótopos en la Precipitación (GNIP) localizadas en Colombia.

Tabla 14. Proyectos de hidrología isotópica (búsqueda no exhaustiva).

ID	Fecha ejecución	Zona geográfica	Ejecutor principal	Objetivo proyecto	Apoyo
1	1983-1986	Atlántico – Bolívar	IAN, Ingeominas	Sub	OIEA
2	1985-1986	Sabana de Bogotá	IAN, Ingeominas, CAR	Sub	OIEA
3	1986	Chivor I y Chivor II	IAN, ISA	Emb	OIEA
4	1989-1990	Cuenca río Magdalena	IAN	Sup	OIEA
5	1990-1993	Tunja (Boyacá)	INEA, UPTC	Sub	OIEA
6	1997-2002	Sabana de Bogotá	Ingeominas, CAR	Sub	OIEA
7	1997-2002	Isla de San Andrés	Coralina	Sub	OIEA
8	2001-2004	Valle del Cauca	CVC, Ingeominas	Sub	OIEA
9	2001-2004	Morroa (Sucre)	Carsucre, Ingeominas	Sub	OIEA
10	2001-2004	Maicao (La Guajira)	Corpoguajira, Ingeominas	Sub	OIEA
11	2001-2004	Pereira (Risaralda)	Carder, Ingeominas	Sub	OIEA
12	2005-2006	Santa Fe de Antioquia	UNAL	Sub	
13	2005-2006	Bajo Cauca antioqueño	UdeA	Pre, Sub	
14	2010-2015	Túnel La Línea (Tolima y Quindío)	UNAL	Tun, Int	
15	2014-2015	Golfo de Morrosquillo	Carsucre	Sub	OIEA
16	2014-2015	Golfo de Urabá	Corpourabá	Sub	OIEA
17	2014-2016	Boyacá Centro Norte	SGC	Pre	
18	2017-2018	Río de Oro (Santander)	UIS	Sub	IRD (Francia)
19	2017	Lago Tota (Boyacá)	UPTC	Sub	
20	2017	Abanico Ibagué (Tolima)	UPTC	Sub	

ID	Fecha ejecución	Zona geográfica	Ejecutor principal	Objetivo proyecto	Apoyo
21	2017	La Dorada (Caldas)	Corpocaldas	Sub	
22	2011-2018	Valle de Aburrá	UdeA	Pre, Sub	
23	2016-2018	Urabá (Antioquia)	UdeA	Sub	U. Montpellier
24	2019	Abanico del Quindío	CRQ	Sub, Pre	
25	2019	Río Otún	A&A, SHI	Bal	
26	2020	Abanico del Quindío	CRQ	Con	

Nota. Sub=acuiferos. Sup=agua superficial. Pre=precipitación. Emb=fugas de embalses. Tun= túneles. Int=conexión agua superficial agua subterránea. Con=contaminación. Bal=balance hídrico. UPTC=Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. A&A=Aguas y Aguas de Pereira. UNAL=Universidad Nacional de Colombia. UIS=Universidad Industrial de Santander. UdeA=Universidad de Antioquia. SHI=Servicios Hidrogeológicos Integrales S.A.S.

El contenido isotópico de la lluvia en Colombia

Las variaciones temporales y espaciales de la concentración isotópica de la lluvia son causadas por el fraccionamiento isotópico durante los cambios de fases como evaporación, condensación y sublimación, y por mezclas de humedades con diferente origen. En un sitio particular, la firma isotópica de la lluvia dependerá de fenómenos atmosféricos sinópticos, a mesoescala o locales. Las trayectorias seguidas por las masas de aire que darán lugar a la precipitación, junto con su historial de evaporación/condensación hasta el punto de observación, son de importancia capital en la conformación del contenido isotópico de la lluvia.

En 2014, el Ideam puso en operación la primera fase de la Red Nacional de Isotopía (RNI) a través de la instalación de seis colectores de agua en diferentes departamentos. El diseño original contó con la asistencia del Instituto de Investigación para el Desarrollo, de la República de Francia (IRD, por sus siglas en francés). En el diseño, se plantea la instalación de 33 estaciones esparcidas por todo el territorio colombiano, incluido el territorio insular de San Andrés. Con este diseño es posible evaluar todo el patrón de circulación atmosférica sobre territorio colombiano. En el 2022, se instalaron dos estaciones al oriente del país: una en la Macarena

y la otra en Puerto Carreño. En la actualidad, trece estaciones están activas, sin incluir las estaciones que hacen parte de la red GNIP.

Rectas meteóricas locales (RML)

Se evaluaron datos de muestras compuestas mensuales de 34 puntos de observación. Trece corresponden a la Red Nacional de Isotopía (RNI); las estaciones RNI Quibdó, RNI Buenaventura y RNI San Andrés recolectan eventos de lluvia. Para este estudio, esos datos han sido agregados a periodos mensuales. Diecisiete puntos pertenecen a la base de datos GNIP; de estos, solo cuatro son estaciones activas: GNIP Bogotá (operada por el Ideam), GNIP Tulenapa (operada por Corpourabá) y GNIP Toluviejo y GNIP El Tesoro (operadas por Carsucre). Dos puntos tienen información del expediente LAV0001 00 2020 de la ANLA. Los datos son de la empresa Minera de Cobre Quebradona S.A.S. Otro punto pertenece a la red Quindiana de Isótopos en la Precipitación (QNIP) operada por la CRQ. El otro punto pertenece a la Red Isotópica de la Cuenca del Río Otún operada por la empresa Aguas y Aguas de Pereira con la asistencia de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).

El mapa de la Figura 33 presenta la localización de las 34 estaciones y los valores de exceso de deuterio para cada promedio ponderado por cantidad de lluvia.

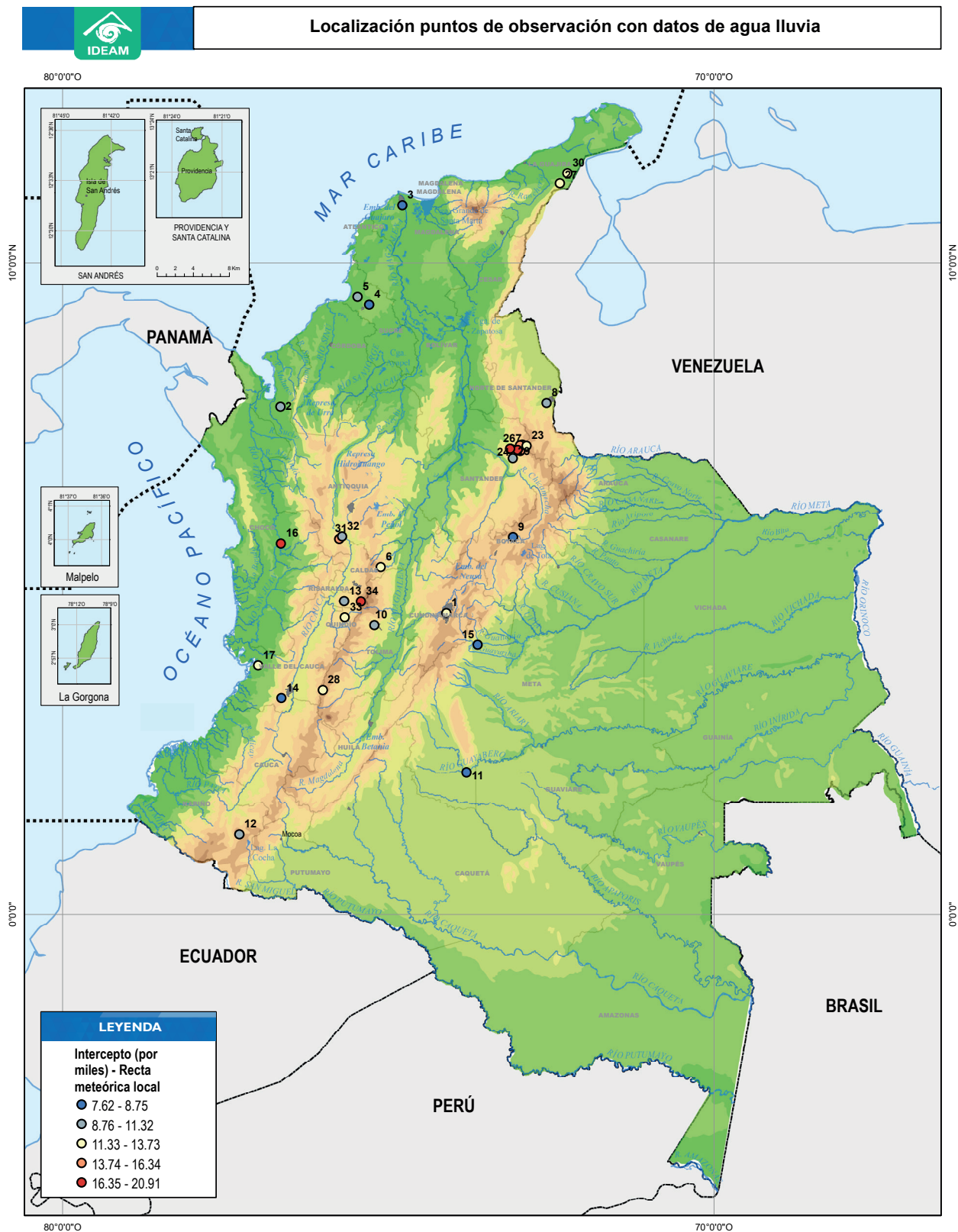


Figura 33. Localización puntos de observación con datos de agua lluvia.

La firma isotópica de la lluvia en Colombia exhibe un ciclo anual bien definido. Los meses isotópicamente más enriquecidos son enero, febrero o marzo y los más empobrecidos son mayo o junio. Las variaciones temporales en la composición isotópica están íntimamente ligadas a cambios en el patrón de circulación atmosférica sobre el país. En general, todas las estaciones evaluadas en el ENA 2022 exhiben un comportamiento similar, lo que sugiere que fenómenos sinópticos o, al menos a mesoescala, son los arquitectos de la firma isotópica en la lluvia. Las diferencias entre estaciones son generadas por factores locales, tanto meteorológicos como geográficos. El reciclaje hídrico a escala regional también debe jugar un papel importante.

El principal fenómeno que controla el régimen de precipitación sobre Colombia es la migración anual de la zona de convergencia intertropical (ZCIT). A su vez, la posición de la ZCIT condiciona otros fenómenos como los vientos alisios y las corrientes en chorro de bajo nivel como el Chorro del Chocó que transportan humedad hacia el continente. Por tanto, la variación mensual del contenido isotópico de la lluvia debe ser evaluada tomando como referencia la ZCIT.

El punto de observación con más datos isotópicos de la lluvia en Colombia es la estación GNIP Bogotá, operada por el Ideam. Esta estación inició actividad en julio de 1971, y en la actualidad sigue aportando datos, aunque presenta algunos vacíos, en especial, durante la década de los años 1990. El análisis que sigue a continuación se centra en esta estación.

Hasta el momento, el análisis se ha centrado en la advección de humedad para explicar las variaciones temporales de la firma isotópica de la lluvia y por cada mes se han mencionado máximo cuatro fuentes. En realidad, gran parte de las lluvias en Colombia se generan por sistemas convectivos que mezclan humedades que viajan a diferentes altitudes. Por tanto, una imagen más real sobre el origen de las precipitaciones debería incluir más fuentes de humedad. En la actualidad, varios investigadores trabajan en la construcción de mo-

delos conceptuales más complejos que permitan explicar algunas tendencias observadas en la composición isotópica de la lluvia en el trópico que no pueden ser interpretadas con enfoques más sencillos, como el modelo tradicional de destilación Raleigh. Algunos de los nuevos paradigmas buscan explicar la variabilidad isotópica a través de índices que reflejan la relación entre lluvias convectivas y estratiformes (Aggarwal et al., 2016). Se espera que la RNI suministre los insumos básicos para que la comunidad científica profundice en el estudio de la dinámica del régimen de precipitación en Colombia.

La Figura 34 muestra las variaciones mensuales del oxígeno 18 para estaciones representativas en Colombia. Las precipitaciones mensuales han sido calculadas teniendo en cuenta solo los meses en los que hay disponibles datos isotópicos. El eje de la ordenada en la izquierda se refiere a la concentración isotópica por miles respecto al patrón VSMOW, mientras que el eje de la ordenada en la derecha representa la lámina mensual de precipitación en mm. Se requiere cautela en la interpretación de los casos en los que solo hay un dato por mes, ya que ese dato puede no representar la tendencia a largo plazo. Las mayores diferencias respecto a la estación Bogotá se observan en los puntos que representan al Caribe y la zona insular. Lamentablemente, por el momento no se tiene una caracterización adecuada de la precipitación en la Amazonía y en la Orinoquía de Colombia.

Por último, la Figura 35 presenta la variación temporal del oxígeno 18 para cuatro estaciones, entre junio de 2019 y marzo de 2020. Aunque los promedios mensuales multianuales siguen en la mayoría de las estaciones un patrón similar, es claro que existen diferencias entre puntos de observación. Si se comparan entre sí las series de GNIP-Tulenapa (30 m s. n. m.) y A&A-La Asomadera (4135 m s. n. m.), es evidente que la composición isotópica de la estación cercana a la línea de costa es siempre mayor que la ubicada en la alta montaña. Pero esa diferencia no es tan obvia entre las estaciones CRQ (1550 m s. n. m.) y GNIP Bogotá (2559 m s. n. m.).

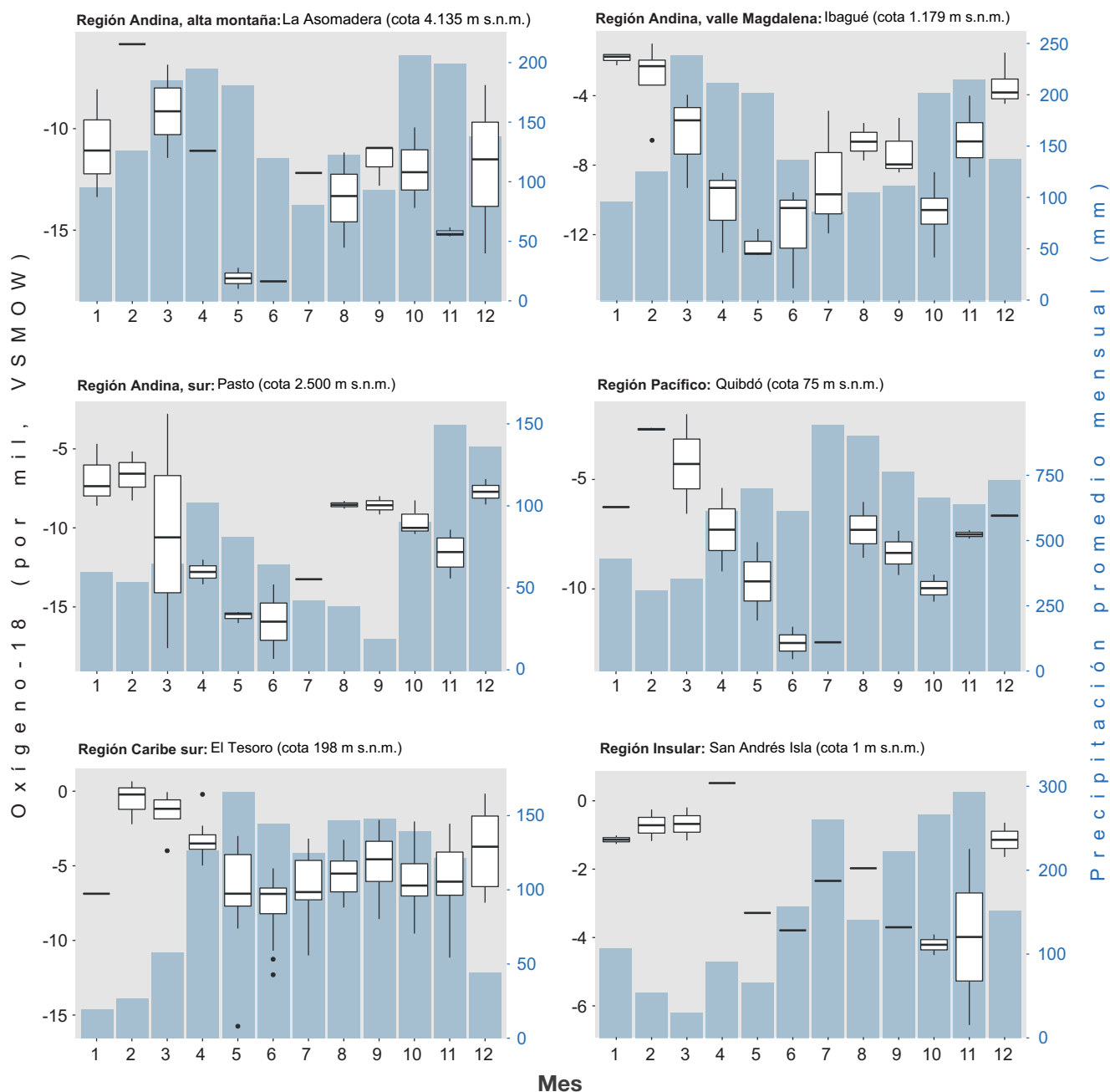


Figura 34. Variación mensual del oxígeno 18 y precipitación, varias estaciones.

Condiciones propias a escala local y regional imparten singularidades en las firmas isotópicas de la lluvia. La Red Nacional de Isotopía (RNI) ofrece una imagen a escala nacional; pero, si el propósito es responder preguntas hidrogeológicas locales, es necesario diseñar y operar redes con una mayor densidad. Por esa razón, entidades como el Área

Metropolitana Valle de Aburrá o Aguas y Aguas de Pereira han implementado sus propias redes isotópicas. En el siguiente numeral se presentan algunos estudios de caso que ilustran la necesidad de implementar redes de observación específicas para abordar problemas particulares.

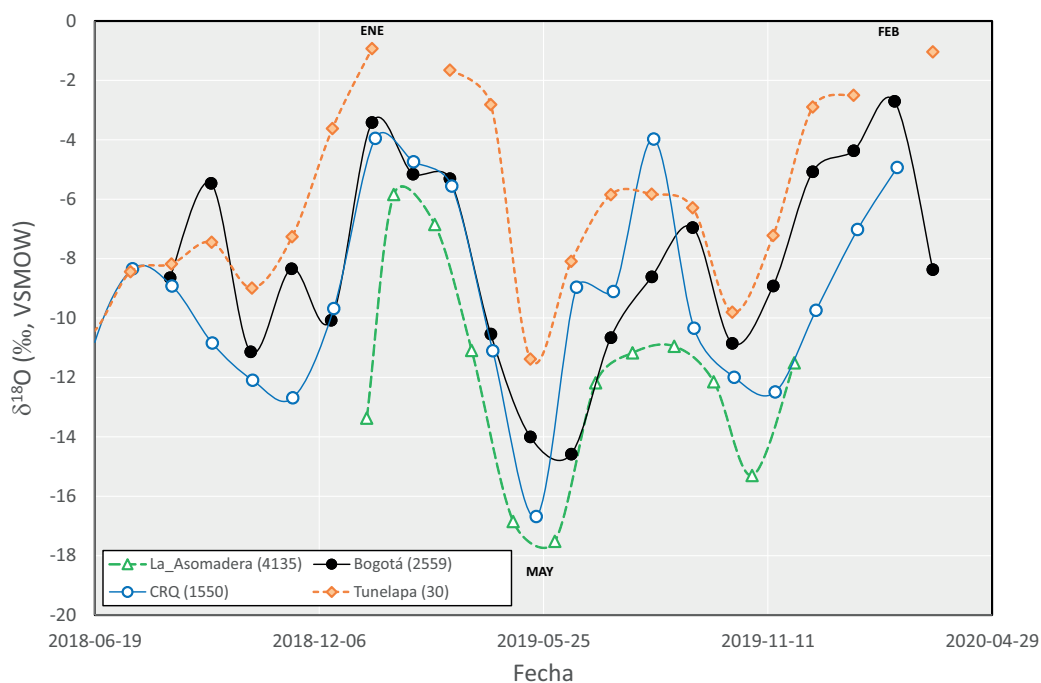


Figura 35. Variación temporal del oxígeno 18 en cuatro estaciones, en el periodo junio de 2019 a marzo de 2020.

Ejemplos de estudios de caso realizados en Colombia

En el ENA 2022, se ilustraron cinco de las aplicaciones isotópicas más populares en hidrología. Cada una de ellas es mostrada con un estudio de caso realizado en Colombia. Aunque el arsenal de herramientas isotópicas es muy amplio, aquí se abordan solo algunos de los isótopos más empleados: nitrógeno 15 y oxígeno 18 en moléculas de nitratos (contaminación por ocurrencia de nitrato en el acuífero somero del Abanico del Quindío); radiocarbono en el carbono inorgánico disuelto (datación de aguas subterráneas en el eje bananero de Urabá utilizando diferentes isótopos, entre ellos tritio y radiocarbono); y deuterio y oxígeno 18 en moléculas de agua (identificación de zonas de recarga de acuíferos en el bajo Cauca antioqueño; conexión de aguas superficiales y subterráneas en Mutiscua, Norte de Santander; e identificación de mezclas de aguas con diferente origen).

Para cada aplicación se realza la importancia del tema en cuestión, se menciona el papel que juegan las técnicas isotópicas para abordar ese tema y se dan a conocer algunas contribuciones hechas por investigadores y entidades colombianas respecto

al conocimiento de los recursos hídricos en el país mediante la evaluación de los isótopos.

7. ¿De qué modo el hombre presiona y afecta el agua y los sistemas hídricos por uso y contaminación?

En el análisis integrado del agua en Colombia ENA 2022, las afectaciones del agua por intervención antrópica considera: las presiones por uso (que involucran los indicadores de índice de uso del agua, transformación de zonas potencialmente inundables y el índice de presión hídrica a los ecosistemas); las presiones por contaminación (definidas por el índice de alteración potencial de la calidad del agua y presiones por producción y transformación de coca); y los indicadores de riesgo (considera el índice de vulnerabilidad al abastecimiento hídrico y el índice de desabastecimiento hídrico de la población en los municipios para condiciones hidrológicas extremas).

En este ítem del resumen se aborda la presión por uso determinada por la demanda hídrica multisectorial y la huella hídrica azul, dado que se aplican a todos los sectores y proveen información con re-

lación directa a la presión generada por el uso del agua sobre las fuentes de agua superficial y subterránea. Se hace una síntesis de los resultados de los indicadores: índice de uso del agua (IUA) e índice de presión hídrica a los ecosistemas (IPHE).

De igual manera, en este punto se realiza una síntesis de la evaluación del estado de la calidad del agua y de las presiones por cargas contaminantes que afectan estas condiciones de calidad debido a vertimientos que potencialmente llegan a las fuentes hídricas superficiales en Colombia sin ningún tipo de tratamiento y que provienen de actividades económicas como industria, población, sacrificio de ganado. Se incluye un resumen con los principales resultados del índice de calidad del agua (ICA) y el índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL).

7.1 Usos del agua

Los puntos del resumen se concentran en los resultados de demanda y huella hídricas *azul*, dado que son aplicados a todos los sectores y proveen información con relación directa a la presión generada por el uso del agua sobre las fuentes de agua superficial y subterránea. Los resultados detallados de la huella hídrica *verde* se desarrollan y presentan en el documento completo del Estudio Nacional del Agua ENA 2022.

El capítulo de “Usos del agua”, en el marco del ENA 2022, presenta un análisis integrado de los conceptos y metodologías asociados a los procesos derivados de la extracción del agua del medio natural, con el propósito intencionado de satisfacer una necesidad humana, bien sea de supervivencia o para generar desarrollo económico con base en la producción de un bien o servicio. Los conceptos básicos asociados a los usos del agua son los siguientes:

Demanda hídrica: parte del principio por el cual existe uso del agua a partir de la acción de extracción de una fuente natural y se define como el “volumen de agua extraído del sistema natural (superficial o subterránea), destinado a suplir los requerimientos de consumo humano, producción sectorial y demandas esenciales de los ecosistemas existentes, sean intervenidos o no” (Ideam, 2010).

Huella hídrica: representa la porción del volumen de agua extraído que no retorna al sistema natural de donde fue tomado inicialmente; representa un uso del agua mutuamente excluyente con otros usos por uno o varios de los cuatro fenómenos básicos que afectan una parte o la totalidad del volumen de agua extraído de una fuente natural (demanda hídrica): (1) incorporación a un producto, (2) evaporación, (3) trasvase de cuenca o (4) reúso de agua (circularidad). El concepto de *huella hídrica* incluye la identificación del origen del agua con base en los conceptos primarios de *agua verde* (proveniente de la lluvia que queda almacenada como humedad en el suelo y que es exclusivamente aprovechada por la vegetación) y *de agua azul* (agua proveniente de la lluvia que se acumula en ríos, quebradas, lagos y acuíferos; esta agua es aprovechable para suplir las diferentes necesidades hídricas de las actividades antrópicas en una cuenca) que permiten la estimación de la *huella hídrica verde*, solo aplicada para el sector agropecuario, y de la *huella hídrica azul*, aplicada para la totalidad de los usos del agua como complemento de la demanda hídrica.

Flujos de retorno: representan el volumen de agua no apropiado por una actividad humana y que se devuelve a la cuenca como excedente de las actividades económicas o del consumo humano. El análisis de los flujos de retorno diferencia el impacto asociado al momento y lugar de retorno. Por ejemplo, la *demanda hídrica* del sector hidroenergético incluye el agua que permanece retenida por un periodo de tiempo y que, por lo tanto, condiciona la disponibilidad de agua para otros usos. Las descargas por agua turbinada, los vertimientos sectoriales y las pérdidas por procesos son consideradas como parte de los *flujos de retorno* (Ideam, 2015).

Se ha mantenido el proceso metodológico de los estudios nacionales del agua anteriores, conservando la coherencia de resultados que para este Estudio Nacional del Agua 2022 fueron del año 2020. Los resultados permiten conocer el estado del uso del agua más actualizado disponible y con la menor incertidumbre posible. Para la versión del ENA 2022 se han presentado algunos cambios significativos que se resumen a continuación:

- Los valores de uso de agua sectorial se continúan ajustando y mejorando de acuerdo con la existencia y calidad de la información base reportada y disponible. Se presentan algunos cambios significativos de volúmenes de uso de agua frente al análisis tendencial esperado, lo cual se explica por las nuevas fuentes de información suministrada directamente por usuarios de agua que, aunque cuentan con mayor detalle y ofrecen mejores resultados, en algunos casos continúan siendo parciales.
- Han existido cambios en el alcance geográfico de recolección y variaciones en los criterios de análisis y reporte de información estadística oficial para algunos sectores (para el sector agrícola la información estadística agropecuaria pasó del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural a la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, lo que ha generado nuevos análisis y resultados). En todos los casos, se ha trabajado con la información disponible actualizada y oficial y se ha analizado e interpretado respecto de la información de estudios nacionales del agua anteriores.
- Para el Estudio Nacional del Agua 2022 se analizó de forma detallada la información del año base 2020, respecto del año 2019 y de años previos analizados en estudios nacionales del agua anteriores, con el propósito de identificar comportamientos atípicos relacionados con la cuarentena global de la pandemia por

COVID-19. La conclusión es que se encontraron algunos comportamientos atípicos que son explicados por la situación especial. No obstante, este comportamiento no invalida el análisis de este año como el año de análisis para el Estudio.

Uso del agua consolidado nacional

El Estudio cuantifica la *demanda hídrica*, la *huella hídrica azul* y la *huella hídrica verde* para el año 2020 (año base de análisis para ENA 2022), analiza el comportamiento tendencial de estas variables usando los valores ajustados con los parámetros de información disponible para ENA 2022, de los años 2008, 2012 y 2016, años que fueron la base de análisis para los ENA 2010, ENA 2014 y ENA 2018, respectivamente.

Se presentan a continuación los resultados consolidados multisectoriales con perspectiva de comparación multianual de *demanda hídrica* y *huella hídrica azul*.

La Figura 36 muestra la demanda total y la huella hídrica azul para los años correspondientes a los cuatro últimos estudios nacionales del agua. La demanda hídrica para el 2020 presenta una disminución del 9 % en comparación con el valor estimado corregido para el 2016. La huella hídrica azul representa un 27,3 % de la demanda hídrica para ese año y presenta también una disminución del 17 % con respecto al valor estimado en el último Estudio Nacional del Agua.

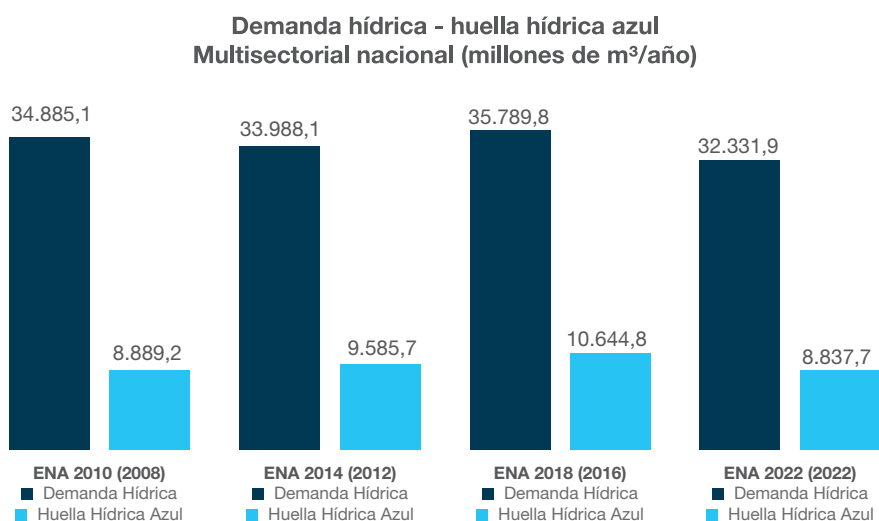


Figura 36. Uso del agua azul multisectorial 2008-2020 (demanda hídrica y huella hídrica azul).

Se han identificado dos factores que han incidido en la reducción de la *demanda hídrica* y la *huella hídrica azul*: (1) Cambios que responden a una situación coyuntural del año de análisis, como son el comportamiento del clima, la distribución temporal y geográfica de la lluvia o la situación asociada con la pandemia, y el confinamiento global que incidió en los comportamientos de la población y, por tanto, en los usos del agua; (2) Cambios en la metodología de recopilación, análisis y consolidación de las fuentes de información disponibles que afectan los resultados.

Se presentan a continuación los resultados consolidados para el sector agropecuario con pers-

pectiva de comparación multianual con los valores publicados para los años 2008, 2012 y 2016 de la *huella hídrica verde*.

En la Figura 37, se presenta el comportamiento de la huella hídrica verde para los años 2008, 2012, 2016 y 2020. La huella hídrica verde agrícola (cultivos permanentes y transitorios) presenta para el año 2020 una disminución de 3 % con respecto a la huella hídrica verde agrícola para el 2016. La huella hídrica verde pecuaria (pastos de corte, forraje y áreas de ganadería extensiva para pastoreo) para el año 2020 presenta un aumento de 27 % con respecto a la huella hídrica verde pecuaria para el 2016.

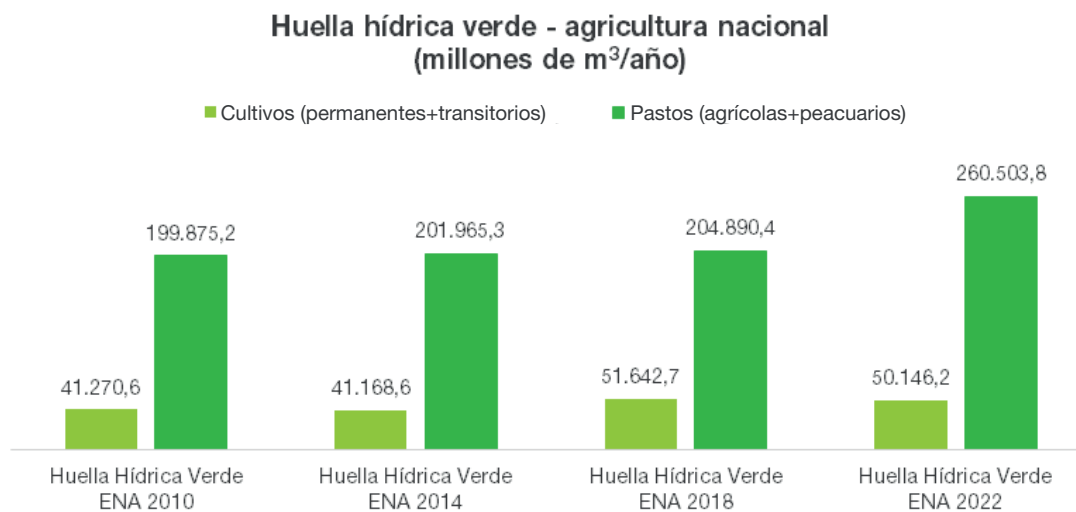


Figura 37. Uso del agua verde agrícola y pecuaria, 2008-2020 (huella hídrica verde).

El principal factor que explica el cambio significativo en el comportamiento tendencial de la huella hídrica verde pecuario (pastos de corte, forraje y áreas de ganadería extensiva para pastoreo) se origina en el manejo de la información estadística de pastos. Se presentan variaciones en la metodología de análisis, interpretación y ajuste de la información de áreas de pastoreo y áreas de pastos de corte y forrajes, lo que implica una variación de áreas y, por tanto, un cambio en la estimación de requerimiento hídrico, que sigue con la premisa general del Estudio Nacional del Agua sobre garantizar el uso de la más actualizada y detallada información oficial disponible para el sector en el ámbito nacional.

Los puntos siguientes de este resumen se concentran en los resultados de demanda y huella hídrica azul, conceptos que son aplicados a todos los sectores y proveen información con relación directa a la presión generada por el uso del agua sobre las fuentes de agua superficial y subterránea. Los resultados detallados de huella hídrica verde se desarrollan y presentan en el documento completo del Estudio Nacional del Agua 2022.

Usos del agua sectoriales

La demanda hídrica sectorial para el 2020 se presenta en la Figura 38, y se encuentra compuesta por un

43,25 % de participación asociada a usos del sector agrícola (agricultura y poscosecha) y un 56,75 % del total generado a partir de actividades no agrícolas

(hidroenergía, piscícola, doméstico, pecuario y sacrificio, minería, hidrocarburos, industria, servicios/oficial y construcción).

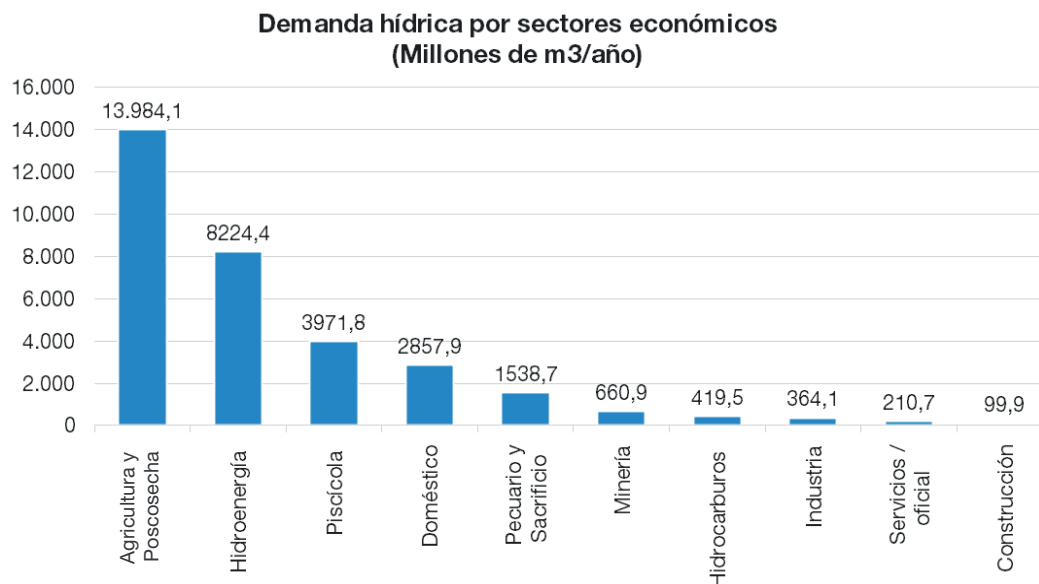


Figura 38. Demanda hídrica por sectores económicos, 2020.

La variación de participación sectorial porcentual de la demanda hídrica para los años 2008 a 2020 se presenta en la Figura 39, y permite ver que la participación porcentual del sector de agricultura y de poscosecha entre 2008 y 2012 constituyó cerca de

la mitad de la demanda hídrica total —con valores estimados de 55,0 % y 49,4 %, respectivamente—, manteniéndose como el principal sector asociado a la demanda hídrica nacional.

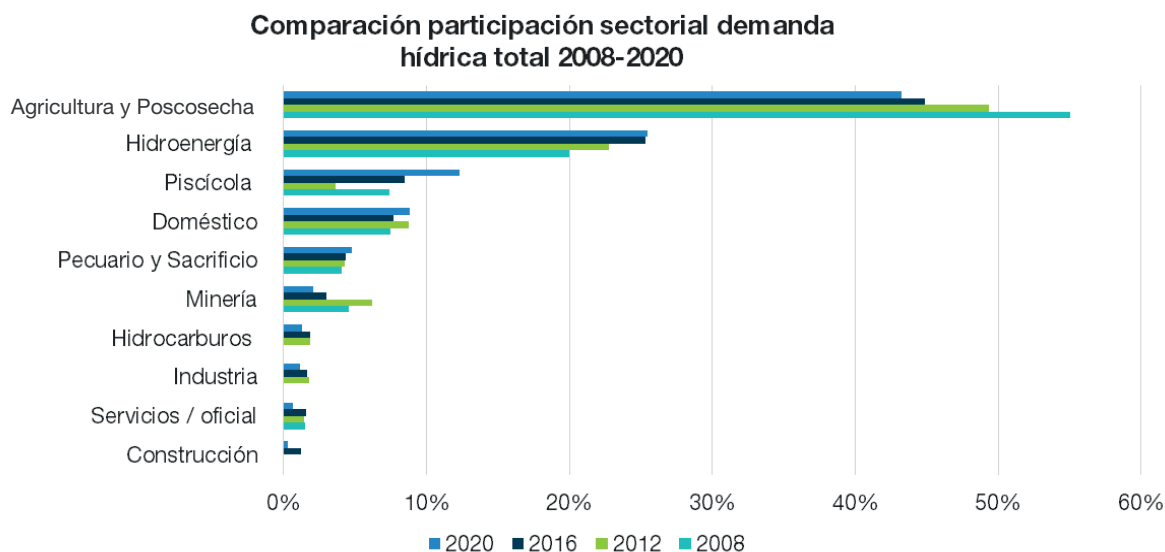


Figura 39. Comparación de la participación sectorial en la demanda hídrica total, 2008-2020.

También se identifica una reducción en la participación porcentual en 2016 y 2020, en un 44,9 % y un 43,3 %, respectivamente. Por su parte, la demanda hídrica en hidroenergía ha ganado participación en el total, pasando del 20,0 % en 2008 al 25,4 % en 2020. La demanda hídrica doméstica mantiene su participación relativamente estable entre 7,5 % y 8,8 %, al igual que el sector pecuario, que se ubica entre el 4,0 % y el 4,8 %. Los demás sectores han tenido mayores fluctuaciones en su participación.

Usos del agua por área hidrográfica

La Figura 40 muestra la distribución geográfica de la demanda hídrica y de la huella hídrica azul. El análisis por área hidrográfica evidencia que la demanda hídrica se distribuye así: 64 % para el área hidrográfica Magdalena-Cauca, 17 % para Orinoco, 15 % para

Caribe, 3 % para Pacífico y 1 % para Amazonas. La huella hídrica azul, por su parte, se distribuye en un 59 % para Magdalena-Cauca, 21 % para Orinoco, 16 % para el Caribe, 3 % para Pacífico y 1 % para Amazonas.

La relación entre demanda hídrica y huella hídrica azul permite estimar que, en promedio, un 33 % del agua extraída no retorna a la cuenca, con valores que oscilan entre el 29 % para el AH Magdalena-Cauca y el 37 % para el AH de Amazonas.

El análisis geográfico de los usos del agua (demanda y huella hídricas) sugiere una mayor comprensión sobre el origen de la presión sectorial generada sobre el agua desde diferentes unidades territoriales. La Figura 41 deja claro que la presión sobre el uso del agua dominante en todo el territorio es generada desde los sectores agrícola, energía y pecuario.

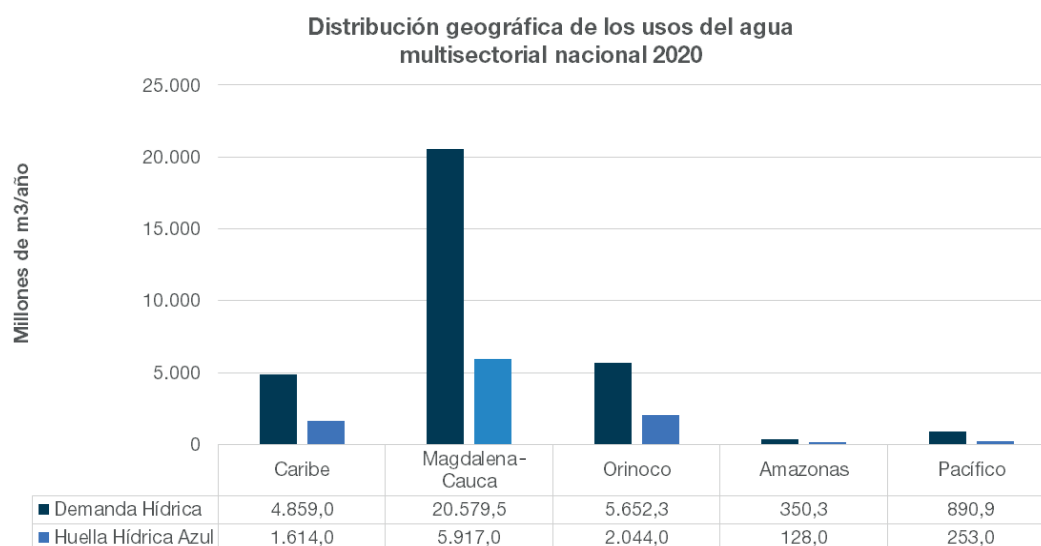


Figura 40. Áreas hidrográficas: demanda de agua y huella hídrica azul.

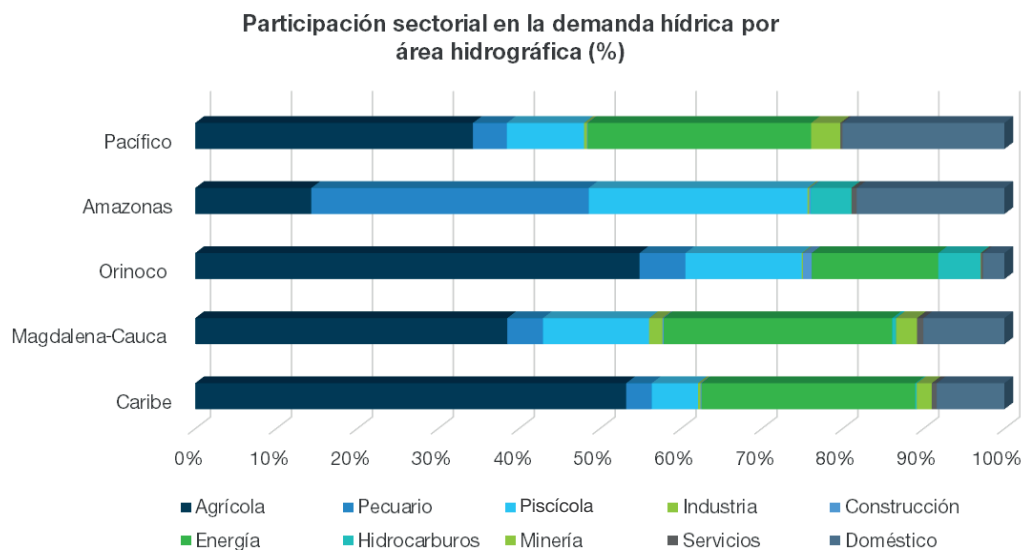


Figura 41. Participación sectorial en la demanda hídrica por área hidrográfica.

Usos del agua por subzona hidrográfica

La Figura 42 muestra las veinte primeras subzonas hidrográficas (SZH) con mayor participación porcentual en la demanda hídrica multisectorial para el año 2020. Estas veinte SZH concentran un 44 % de la

demanda hídrica total; las diez primeras concentran un 30 % del total, mientras que las cinco primeras emplean un 18 % del total. La mitad de la demanda hídrica total está concentrada en veintiséis SZH, lo que implica que se encuentra en tan solo el 8 % de las SZH (de un total de 316 SZH).

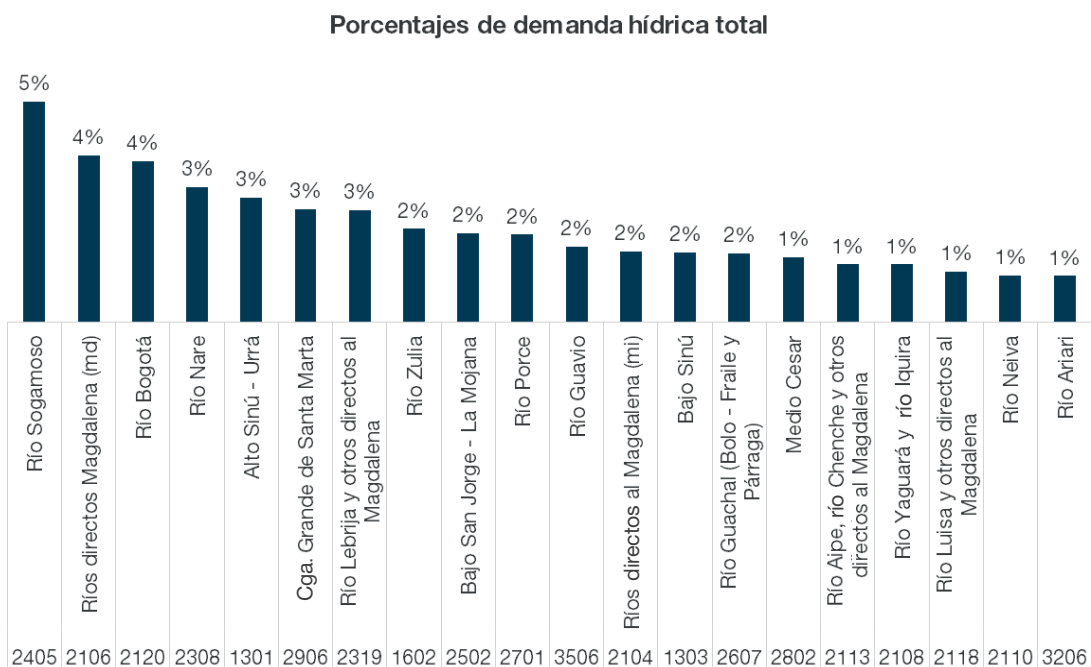


Figura 42. Participación en la demanda hídrica por subzona hidrográfica, 2020.

La figura 43 muestra las veinte primeras SZH con la mayor participación porcentual en la huella hídrica azul multisectorial para el año 2020. El análisis de huella hídrica azul por SZH permite identificar los territorios con la mayor participación porcentual en usos que generaron apropiación humana de agua y un uso mutuamente excluyente con otros usos

para 2020. Las primeras veinte SZH concentran un 41 % de la huella hídrica azul total: las 10 primeras concentran un 27 % del total y las cinco primeras, un 18 % del total. La mitad de la huella hídrica azul total está concentrada en las primeras 28 subzonas hidrográficas, lo que implica que el 50 % de la huella hídrica azul total está en tan solo el 9 % de las SZH.

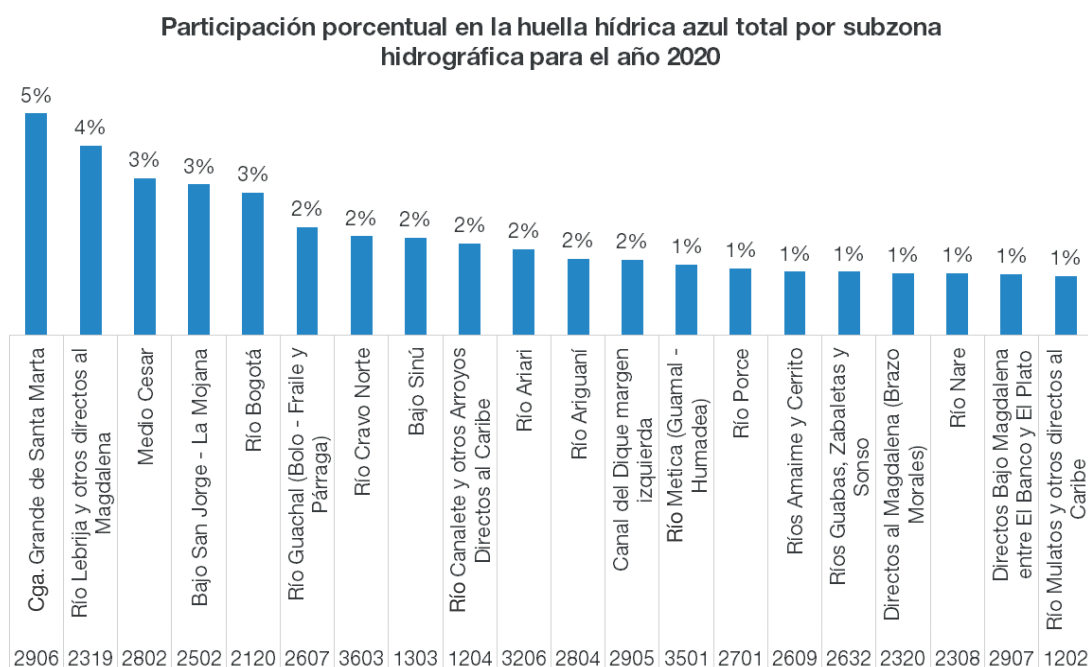


Figura 43. Participación porcentual en la huella hídrica azul total por subzona hidrográfica, 2020.

La Figura 44 muestra las veinte primeras SZH con la mayor participación porcentual en la demanda hídrica multisectorial para el año 2020, con la distribución porcentual por sectores en cada una de las subzonas.

La Figura 45 muestra el mapa de demanda hídrica en Colombia para el año 2020. Se identifica una

importante concentración en las SZH asociadas al sector energético y en las SZH asociadas a zonas con una alta vocación agrícola de cultivos permanentes, con requerimiento hídrico no satisfecho con la precipitación disponible. Esto significa una demanda potencial de riego; en este aspecto, sobresalen cultivos como el banano y la palma de aceite en la zona norte del país.

Demanda hídrica en las 20 subzonas principales por sector

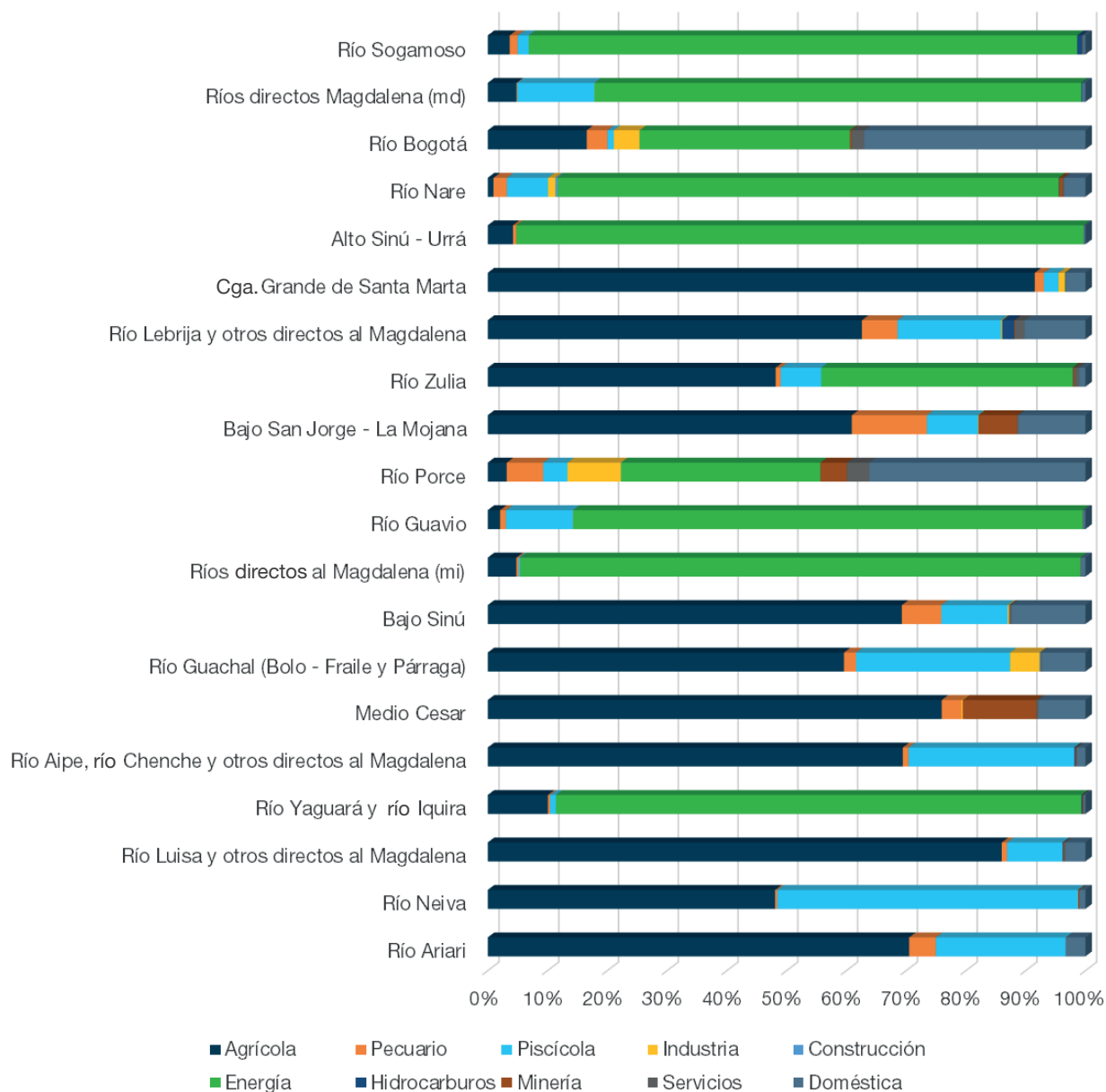
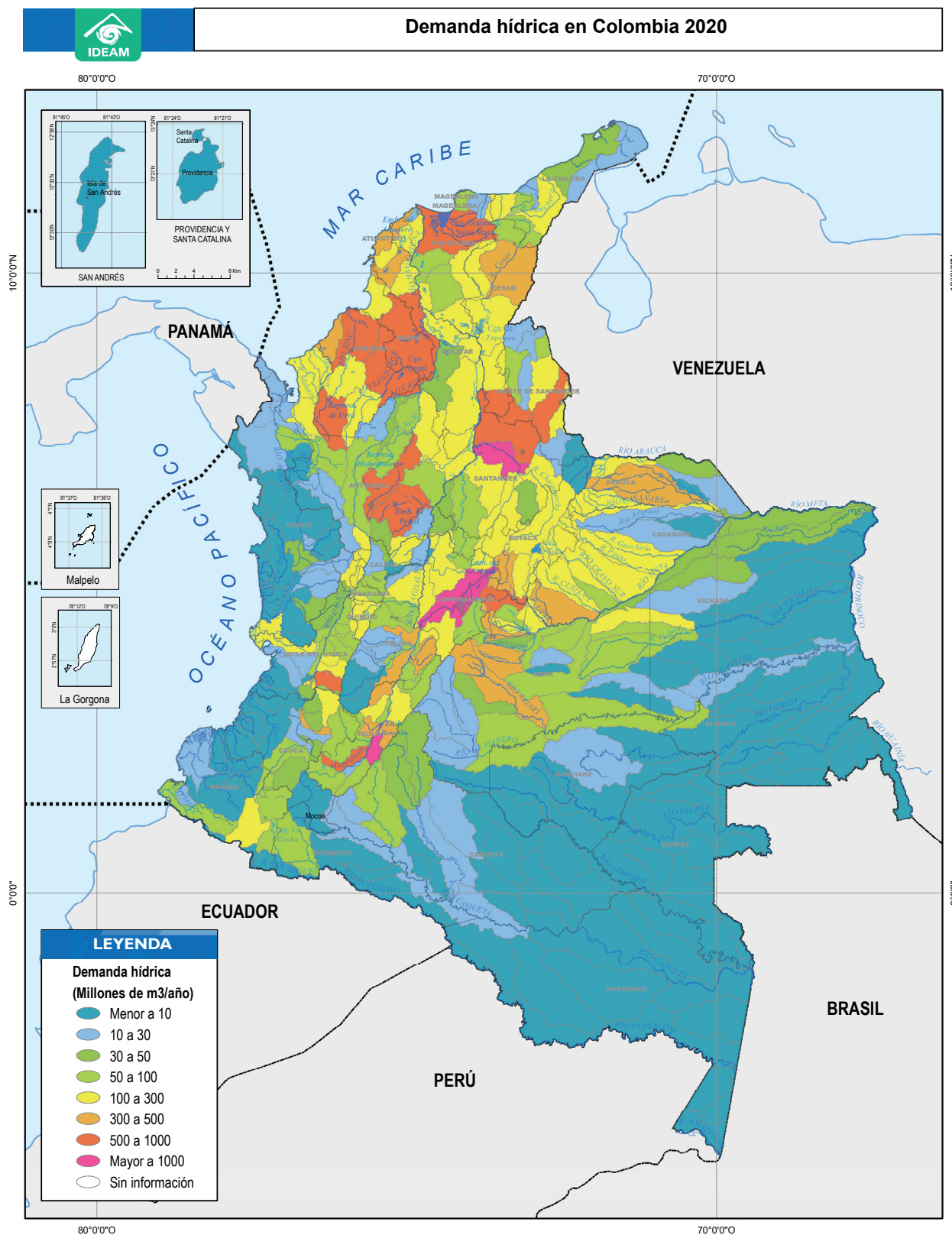


Figura 44. Composición sectorial de la demanda hídrica en las 20 subzonas con mayor participación porcentual con relación al total nacional.

Usos del agua por departamento

La Figura 46 muestra la participación de la demanda hídrica multisectorial por departamentos, lo que permite identificar la incidencia sectorial desde una perspectiva decreciente. A esta escala, es posible identificar situaciones diversas: se encuentran de-

partamentos que presentan un comportamiento similar al identificado en las grandes áreas hidrográficas, pero hay otros departamentos que claramente muestran vocaciones diferentes en el uso del agua, como puede ser la generación de energía hidroeléctrica, la industria o el abastecimiento a la población.



Composición sectorial de la demanda hídrica por departamentos

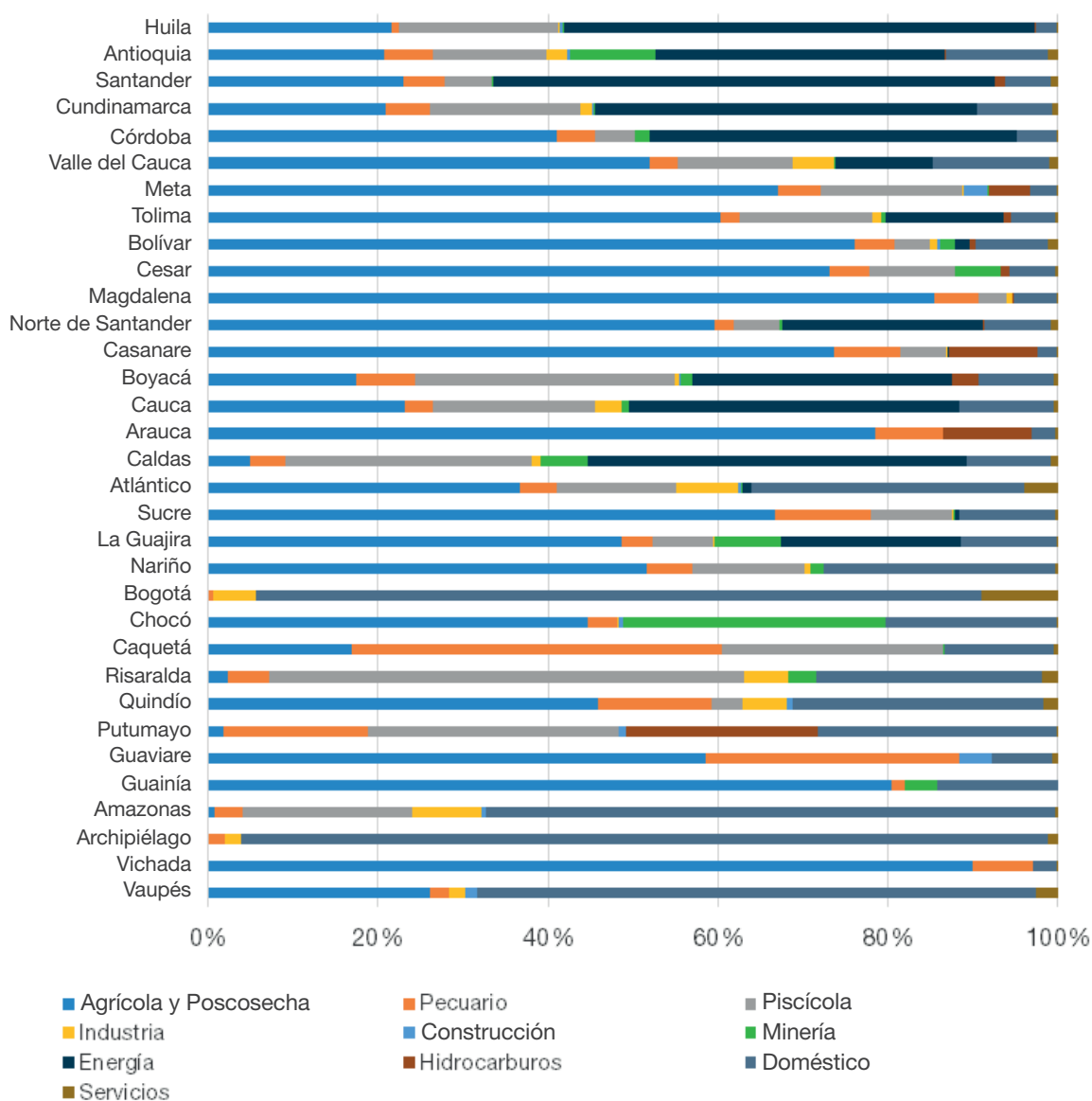


Figura 46. Composición sectorial de la demanda hídrica por departamento.

Indicadores de presión por uso del agua

Los indicadores de presión sobre el recurso hídrico son las herramientas que permiten utilizar el resultado consolidado multisectorial de los usos del agua mediante relaciones con variables que determinan el estado de oferta natural disponible de agua en ese mismo territorio. Estos indicadores hacen posible identificar los territorios, en este caso, las subzonas

hidrográficas donde se ejerce alta presión, lo que genera una situación de potencial conflicto por uso del agua.

En ENA 2022 se analizan los resultados del índice de uso de agua (IUA), del índice de agua no retornada a la cuenca (IARC), del índice de presión hídrica a los ecosistemas (IPHE) y del índice de eficiencia en el uso del agua (IEUA). Los tres primeros presentan

relación de uso de agua frente a la condición natural de la subzona hidrográfica; y el cuarto presenta una relación entre variables de uso, con base en las definiciones detalladas de los fenómenos que describen respecto de la extracción de agua y al volumen de no retorno a la fuente de agua.

Los resultados del IUA y del IPHE se incluyen como factores del análisis integrado del agua en Colombia en relación con las afectaciones por intervención antrópica. A continuación, se presenta la síntesis de la evaluación de estos dos índices.

Relación entre la demanda hídrica y la oferta disponible (IUA)

El índice de uso de agua (IUA) es el valor numérico que, en una de seis categorías, califica la relación

entre la demanda hídrica multisectorial en una subzona hidrográfica en un periodo de tiempo y la oferta hídrica superficial disponible para ese mismo periodo. Refleja la capacidad que tienen las subzonas hidrográficas para sostener los volúmenes de agua extraídos generados por las actividades antrópicas que se desarrollan en una subzona hidrográfica, sin importar si este volumen retorna total o parcialmente. En caso de que una subzona hidrográfica presente un estado crítico, significa que esta ya agotó su disponibilidad de agua superficial para satisfacer los requerimientos hídricos de las actividades económicas que se desarrollan en dicha subzona.

La distribución espacial por SZH con diferentes categorías para el IUA, según condiciones hidrológicas de año medio y año seco, se muestra en los mapas de la Figura 47.

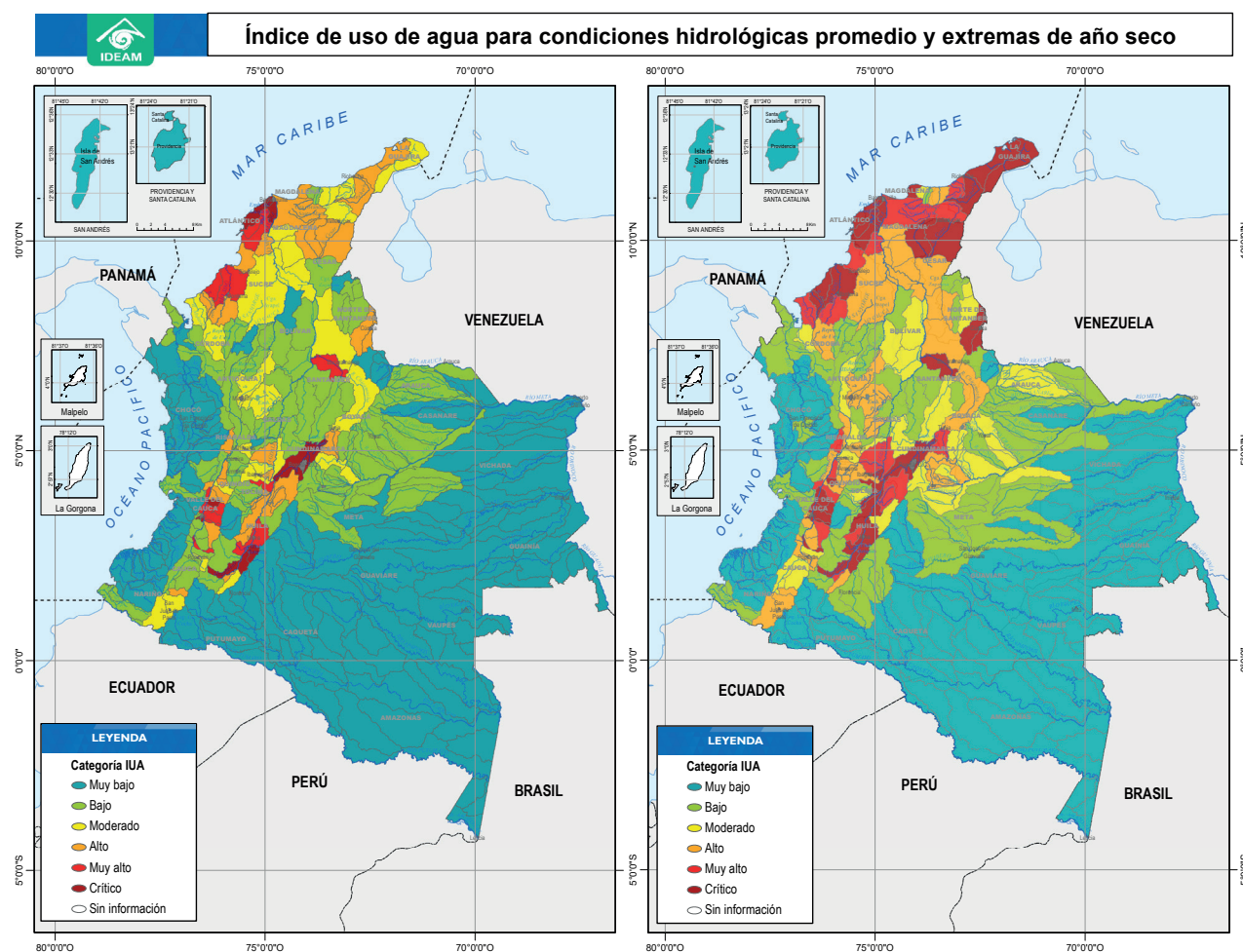


Figura 47. Índice de uso de agua para condiciones hidrológicas promedio y extremas de año seco.

En la Figura 48, se presenta la distribución porcentual de estado de IUA para todas las SZH en Colombia, evaluado el indicador para una condición hidrológica

de año medio en la oferta disponible y para la condición de año seco.

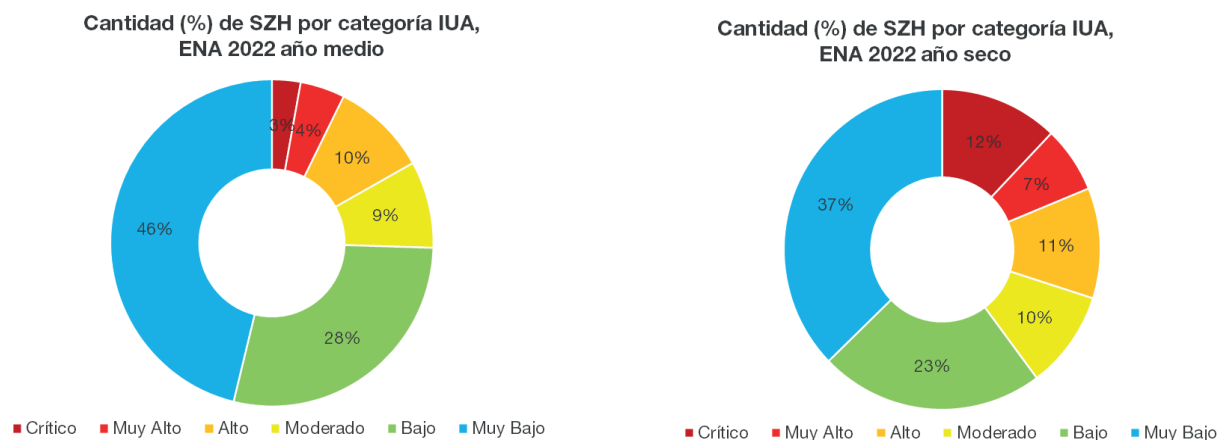


Figura 48. Distribución porcentual de estado de IUA por SZH en Colombia, año medio (izq.) y año seco (der.).

La conclusión de la distribución del estado del IUA por SZH es que la condición de año seco aumenta en un 13 % el número de SZH que están en categorías “crítico”, “muy alto” y “alto”, pasando de un 17 % de las SZH en condición de año medio a un 30 % de las SZH en condición de año seco. Estos

cambios de estado de IUA tienen una clara concentración de SZH en condición de IUA crítica, muy alta, alta o moderada para el AH Magdalena-Cauca.

La Tabla 15 muestra la distribución de las 316 SZH según las categorías del IUA.

Tabla 15. Índice de uso de agua: subzonas por categoría y área hidrográfica.

Índice del uso del agua												
CATEGORIZACIÓN	Número de subzonas por área hidrográfica											
	Amazonas		Caribe		Magdalena - Cauca		Orinoco		Pacífico		Total	
	Año medio	Año seco	Año medio	Año seco	Año medio	Año seco	Año medio	Año seco	Año medio	Año seco	Año medio	Año seco
Crítica			1	10	8	28					9	38
Muy alta			2	5	12	15		1			14	21
Alta			8	3	20	24	1	5	1	3	30	35
Moderada			6	4	17	12	2	13	2	2	27	31
Baja		4	12	12	43	25	27	24	7	7	89	72
Muy baja	57	53	17	12	5	1	43	30	23	21	145	117
Sin información									2	2	2	2
Total general	57	57	46	46	105	105	73	73	35	35	316	316

Con los resultados para este índice en condiciones hidrológicas promedio, se identifican 53 subzonas con altas presiones por uso en relación con la oferta hídrica disponible, las cuales se concentran en las áreas hidrográficas Magdalena-Cauca y Caribe, con 57 % y 21 %, respectivamente. El número de subzonas con baja capacidad para sostener los volúmenes de agua que demandan los usuarios del recurso (IUA) se incrementa en 43 (total 96) cuando las condiciones hidrológicas corresponden a un año seco.

Los resultados de IUA por SZH para las condiciones de año medio y año seco se presentan en el **Anexo 2**. Dado que el IUA se incluye en el proceso de análisis integrado, los mapas correspondientes se presentan en ese capítulo.

Índice de presión hídrica a los ecosistemas (IPHE)

Este índice relaciona la huella hídrica verde generada por el sector agropecuario y forestal presente en una

unidad espacial de análisis, como la subzona hidrográfica, en un periodo de tiempo, y la disponibilidad de agua verde para ese mismo periodo. A través de este índice, se busca identificar en qué cuencas se presenta competencia por agua verde asociada a competencia por uso del suelo entre las actividades existentes, específicamente del sector agropecuario, y las zonas de protección de ecosistemas estratégicos requeridas para la provisión y mantenimiento de servicios ecosistémicos en las cuencas.

Se han establecido seis categorías de valores que permiten estimar el estado del índice en cada una de las subzonas hidrográficas nacionales, desde muy bajo hasta crítico. La distribución espacial por SZH con diferentes categorías para el IPHE según condiciones hidrológicas de año seco en la oferta disponible se muestran en el mapa de la Figura 49.

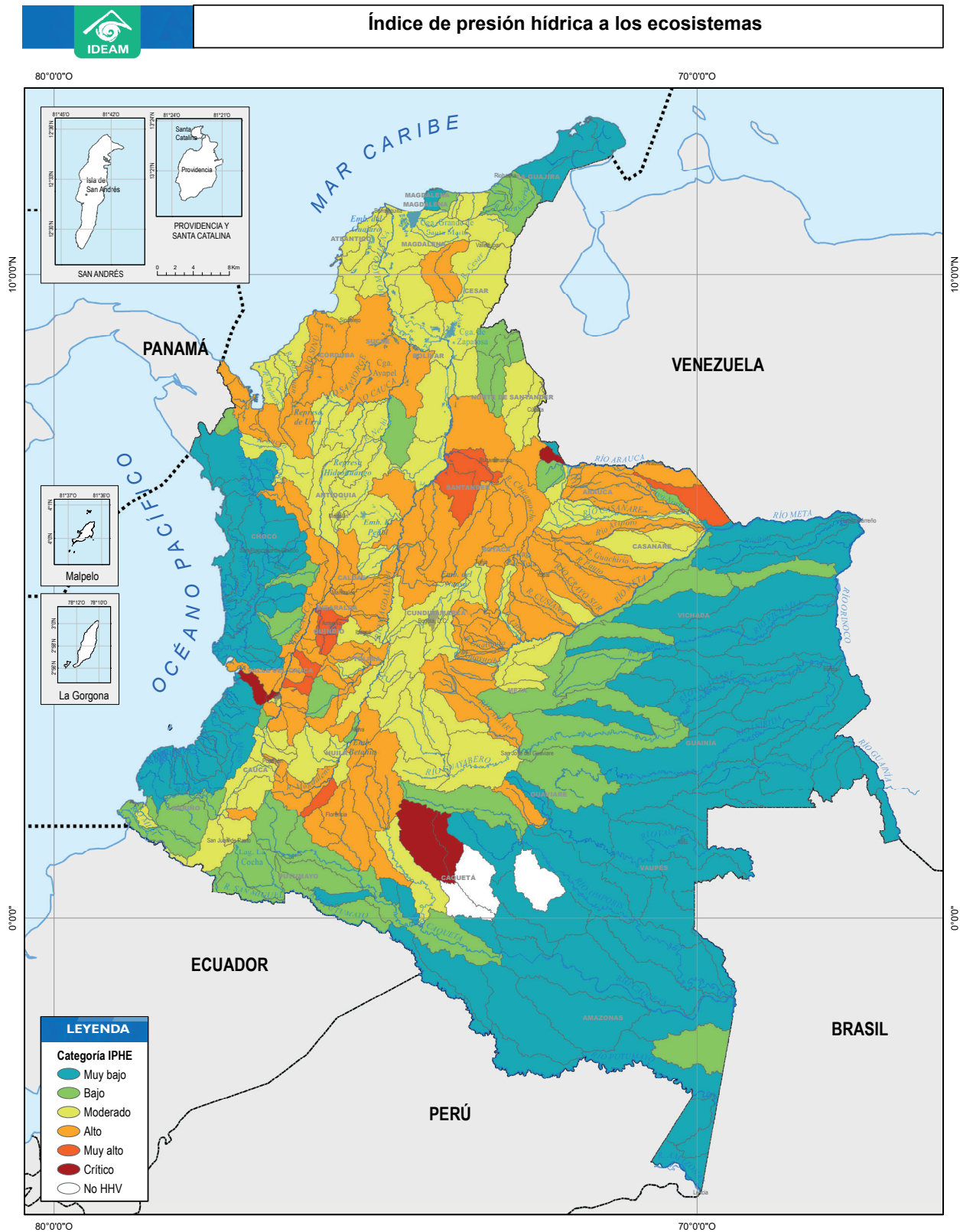
En la Tabla 16 se relacionan el número de subzonas hidrográficas por categoría y por área hidrográfica, resultado de los estimativos para el IPHE.

Tabla 16. Índice de presión hídrica sobre los ecosistemas, subzonas por categoría y área hidrográfica.

Índice de presión hídrica sobre los ecosistemas (IPHE)						
CATEGORIZACIÓN	Número de subzonas por área hidrográfica					
	Amazonas	Caribe	Magdalena - Cauca	Orinoco	Pacífico	Total
Crítica	2		1	1	1	5
Muy alta			6	1		7
Alta	6	8	51	20	2	87
Moderada	1	11	43	17	6	78
Baja	9	10	4	11	6	40
Muy baja	35	14		22	18	89
Sin Información	4	3		1	2	10
Total general	57	46	105	73	35	316

Los valores críticos se presentan en cinco SZH, de las cuales dos están en el área hidrográfica del río Amazonas. De las 94 subzonas con competencia por agua verde (categorías *muy alta* y *alta* de este índice), el 61 % pertenecen al área hidrográfica Magdalena-Cauca y el 22 % a la del río Orinoco. Las

áreas hidrográficas con el mayor número de SZH con valores *bajos* y *muy bajos* están asociadas con las cuencas del Amazonas, Orinoco y Pacífico, con 35 %, 24 % y 19 % del total (140 SZH), respectivamente, lo cual indica situación favorable para ecosistemas estratégicos de estas subzonas.



Flujos de agua virtual

Los *flujos de agua virtual* hacen referencia a los intercambios de agua que se dan entre países gracias al comercio internacional. El análisis del flujo de agua virtual en el marco del ENA2022 parte de un análisis de los volúmenes de los ocho principales cultivos de exportación del país en 2020; estos productos fueron: aguacate, banano, cacao, café, caña de azúcar, flores y follajes, palma de aceite y plátano; con esto se obtiene un resultado de huella hídrica de dicha producción y una estimación del volumen de agua que fue requerido para satisfacer esta actividad, identificando el volumen de agua virtual exportada,

qué países importadores generaron esta demanda y de qué área hidrográfica salió.

En relación con el destino de flujos de agua virtual exportados desde Colombia en el año 2020, la gráfica de la Figura 50 muestra la proporción de volúmenes de agua en relación con los países destino que generaron la demanda de productos. Estados Unidos es el principal destino del agua virtual colombiana, con una participación del 31 %, gracias al fuerte relacionamiento en términos comerciales; y es el consumidor principal de la mayoría de los cultivos priorizados, lo cual representa alrededor de 3.832 millones de m³ por exportación para el año 2020.

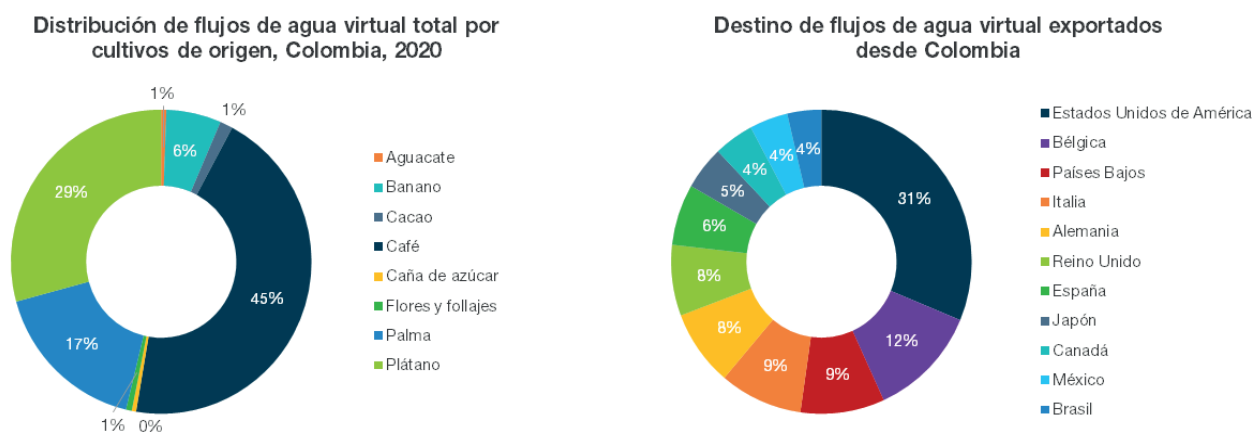


Figura 50. Distribución por cultivo y destino de flujos de agua virtual total en Colombia, 2020.

Fuente: datos de Trade Map.

La distribución de los flujos de agua virtual por producto agrícola priorizado identifica al café como el cultivo que representa la mayor cantidad de agua virtual, con un 45 % del total; y está seguido por el plátano y la palma, con el 29 % y el 17 %, respectivamente. La gráfica permite identificar estos tres cultivos con una concentración de más del 90 % de todo el flujo de agua virtual de Colombia para el año de análisis.

Proyecciones de uso de agua 2021-2040

Las proyecciones de uso del agua en ENA 2022 solo consideran la demanda hídrica y se calculan para los siguientes sectores: agrícola y poscosecha; pecuario, minería, hidrocarburos, energía, servicios y doméstico. Se excluyen de las proyecciones los otros

sectores dada la incertidumbre incluida en la información base que no permite generar una estimación de demanda hídrica proyectada confiable.

Este análisis de proyecciones en el uso del agua se plantea con un año horizonte a 2040, lo que hace posible incluir los resultados correspondientes a la variación asociada al cambio climático coincidente con ese año. Se analizan tres escenarios: optimista, tendencial y pesimista.

7.2 Calidad del agua

En el ENA 2022, se actualiza la evaluación del estado de la calidad del agua y la presión por vertimientos a las fuentes hídricas superficiales en Colombia. Se realiza principalmente en función de dos indicado-

res: el índice de calidad del agua (ICA) y el índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL). Para las condiciones de calidad se analizan variables fisicoquímicas, metales pesados en sedimentos y el ICA, a partir de información de la Red de Referencia Nacional de Ideam, de convenios y de redes de monitoreo de autoridades ambientales regionales, como las corporaciones autónomas regionales del Valle del Cauca (CVC) y de Cundinamarca (CAR). Se analizan las presiones por contaminación asociadas con los vertimientos de aguas residuales por los sectores usuarios del recurso para el año 2020, como son el doméstico, el de beneficio de café, la industria manufacturera (38 actividades económicas) y el sacrificio de ganado. Además, a nivel regional, se presenta la evaluación de la calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a una mayor resolución que la del ENA con información de la CAR.

En relación con el mercurio, se relacionan la información de plataformas que en la actualidad monitorean el uso de este elemento en la actividad minera y los datos reportados por el Ejército de Colombia en términos de mercurio incautado. Además, se reporta tanto la demanda potencial nacional de agroquímicos en la agricultura desde 2008 hasta 2020 como el uso de plaguicidas en Colombia; para ello, se usan los aportes y los resultados de las investigaciones e información del Programa de vigilancia epidemiológica de plaguicidas organofosforados y carbamatos (VEO) del Instituto Nacional de Salud para el periodo 2017-2021.

En el Estudio, se mantienen los conceptos y metodologías tanto para estado como para presión, donde el estado hace referencia a las condiciones de la calidad del agua —que están dadas por sus características físicas, químicas y biológicas— y la presión que representa los vertimientos generados por las actividades económicas y poblacionales que son descargados en las fuentes hídricas superficiales (Ideam, 2015).

Evaluación del estado de la calidad del agua

En los siguientes ítems se sintetiza la evaluación del estado de la calidad del agua teniendo como base los resultados de los monitoreos realizados por el Ideam en puntos ubicados en las corrientes hídricas superficiales. Dicho monitoreo da cuenta

del estado ambiental de la calidad del agua en el momento de la toma de muestra.

Concentración de carbono orgánico total, nitrógeno amoniacal, oxígeno disuelto y sólidos totales

En la Figura 51, se observan los puntos monitoreados por Ideam en 2021. Cada uno de los mapas representa las concentraciones de carbono orgánico total (COT), nitrógeno amoniacal (NA), oxígeno disuelto (OD) y sólidos totales (ST), variables que reflejan intervención antrópica por posibles vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales.

En el momento de la toma de muestra de calidad el agua, se identifican puntos de monitoreo con concentraciones altas en los cuatro parámetros (COT, OD, NA y ST). En cuanto al **carbono orgánico total** (COT), se observan concentraciones mayores que 20 mg/l en los puntos ubicados sobre las corrientes de los ríos Pasto, Bogotá, Chicamocha (en el punto ubicado a la altura del municipio de Sogamoso, en Boyacá) y Cauca (a la altura del municipio de Caucasia, Antioquia). En **nitrógeno amoniacal**, se identifican concentraciones mayores que 5 mg/l sobre la corriente del río Bogotá; del río Lebrija, a la altura del punto Café Madrid, ubicado en Girón, Santander; y en el río Cesar, punto ubicado a la altura del municipio de Valledupar. Se registraron concentraciones de **oxígeno disuelto** (OD) entre 0 y 2 mg/l en los puntos ubicados sobre el río Bogotá y con concentraciones de **sólidos totales** por encima de 1.000 mg/l se identifican en corrientes como Pamplonita, en el punto Aguas Claras, en Cúcuta, Norte de Santander; en el río Negro, a la altura del municipio de Puerto Salgar; en el río Guayuriba, a la altura del municipio de Villavicencio; en el río Cauca, a la altura del municipio de Caucasia; en el río Magdalena y parte baja del río Bogotá, a la altura de los municipios de Tena, Tocaima y Girardot.

Concentración de mercurio en sedimentos

La concentración de mercurio en sedimentos, medida por el Ideam en el año 2021 en 15 estaciones, se presenta en la Figura 52.

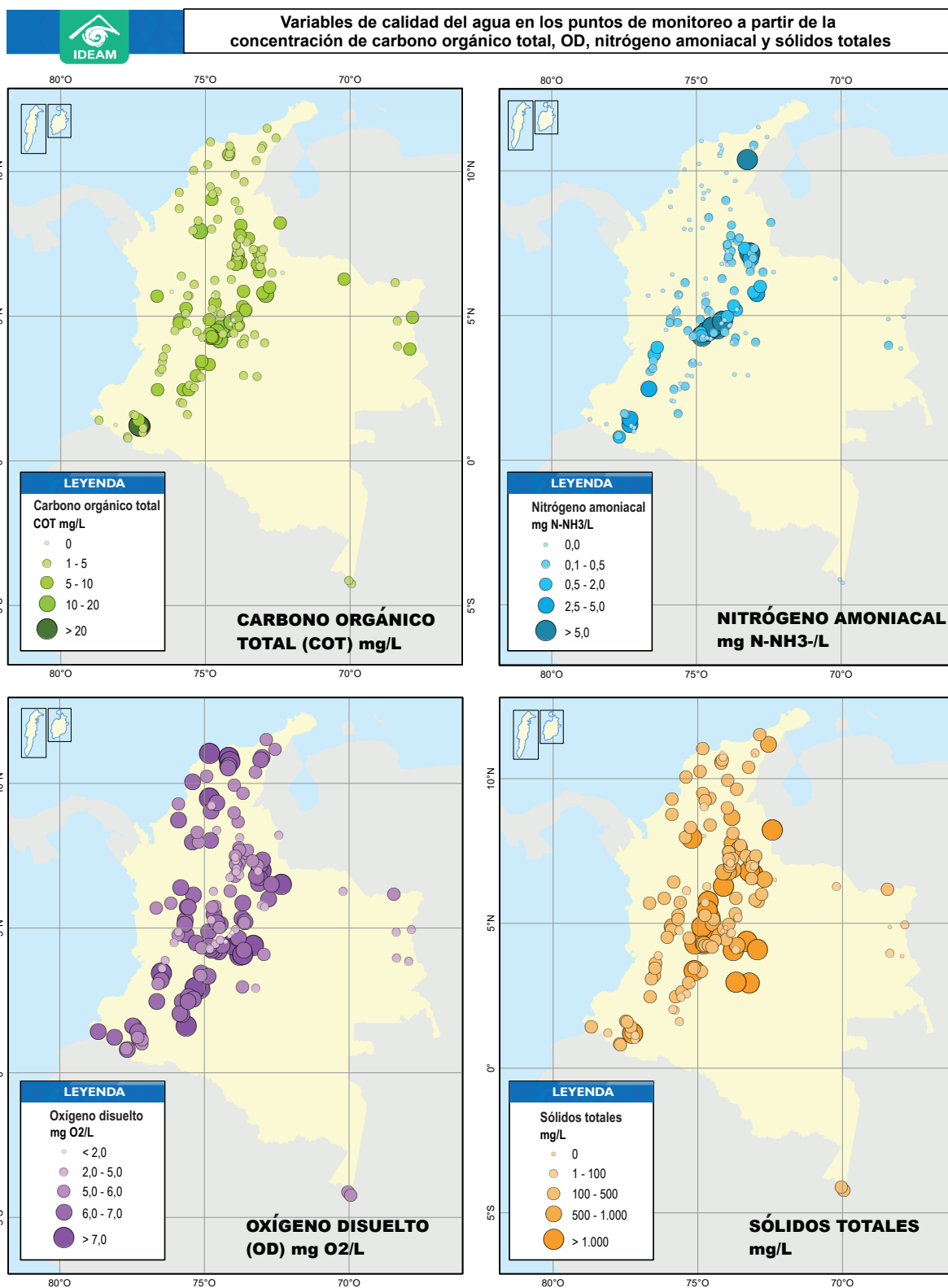


Figura 51. Variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir de concentración de carbono orgánico total, oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal y sólidos totales.

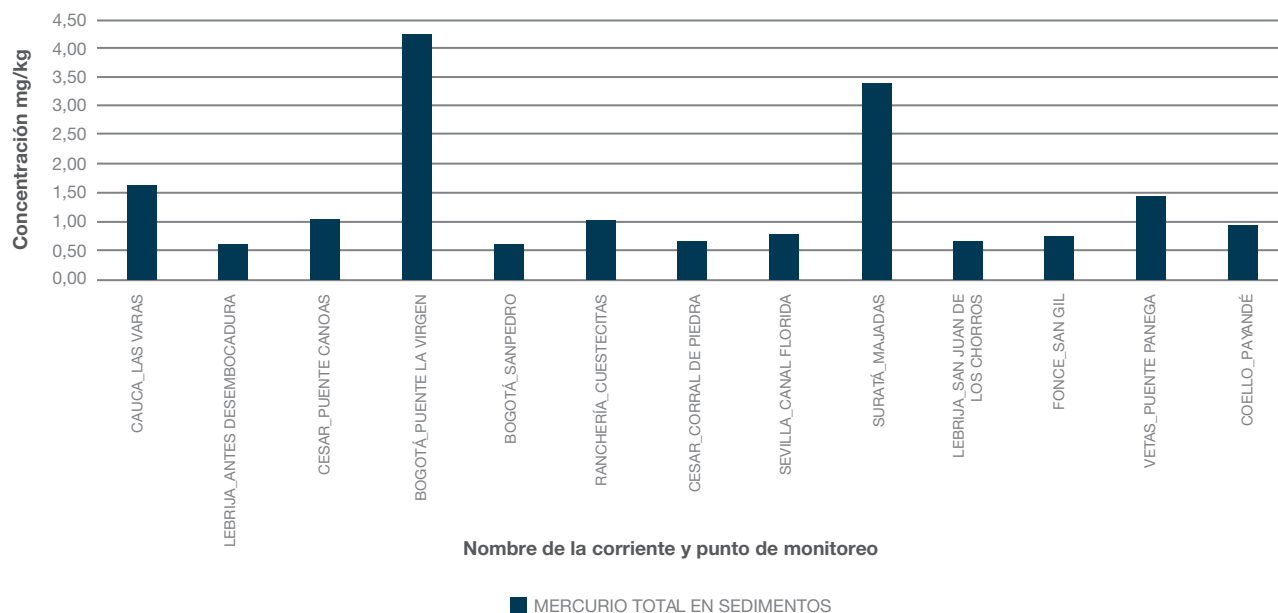


Figura 52. Concentración mercurio total en sedimentos.

Las mayores concentraciones de mercurio se encontraron en las corrientes: del río Bogotá, en el punto Puente La Virgen (4,23mg/kg), a la altura del municipio de Cota; sobre el río Suratá, en el punto Majadas en jurisdicción de la ciudad de Bucaramanga (3,40 mg/kg); sobre el río Cauca, en el punto Las Varas (1,61 mg/kg) a la altura del municipio de San Jacinto del Cauca; y sobre el río Vetás, en Puente Panega (1,42 mg/kg) a la altura del municipio de Suratá, Santander.

Índice de calidad del agua (ICA)

El ICA se calcula con los resultados de las mediciones de seis variables: pH, OD, DQO (demanda química de oxígeno), SST (sólidos suspendidos totales), CE (conductividad eléctrica) y relación NT/PT (nitrógeno total/fósforo total), representativas de los principales contaminantes; se tuvo en cuenta información recolectada a partir de 305 monitoreos realizados durante el año 2021 en 162 puntos. En el mapa de la Figura 53, se observan los resultados de ICA para los 162 puntos de monitoreo y la calidad de agua según la categorización del índice que para el presente análisis se encuentra desde “bueno” hasta “malo”, sin presentar la categoría “muy mala”.

Del total de puntos de monitoreo del Ideam en 2021, el 78 % se concentra en el área hidrográfica

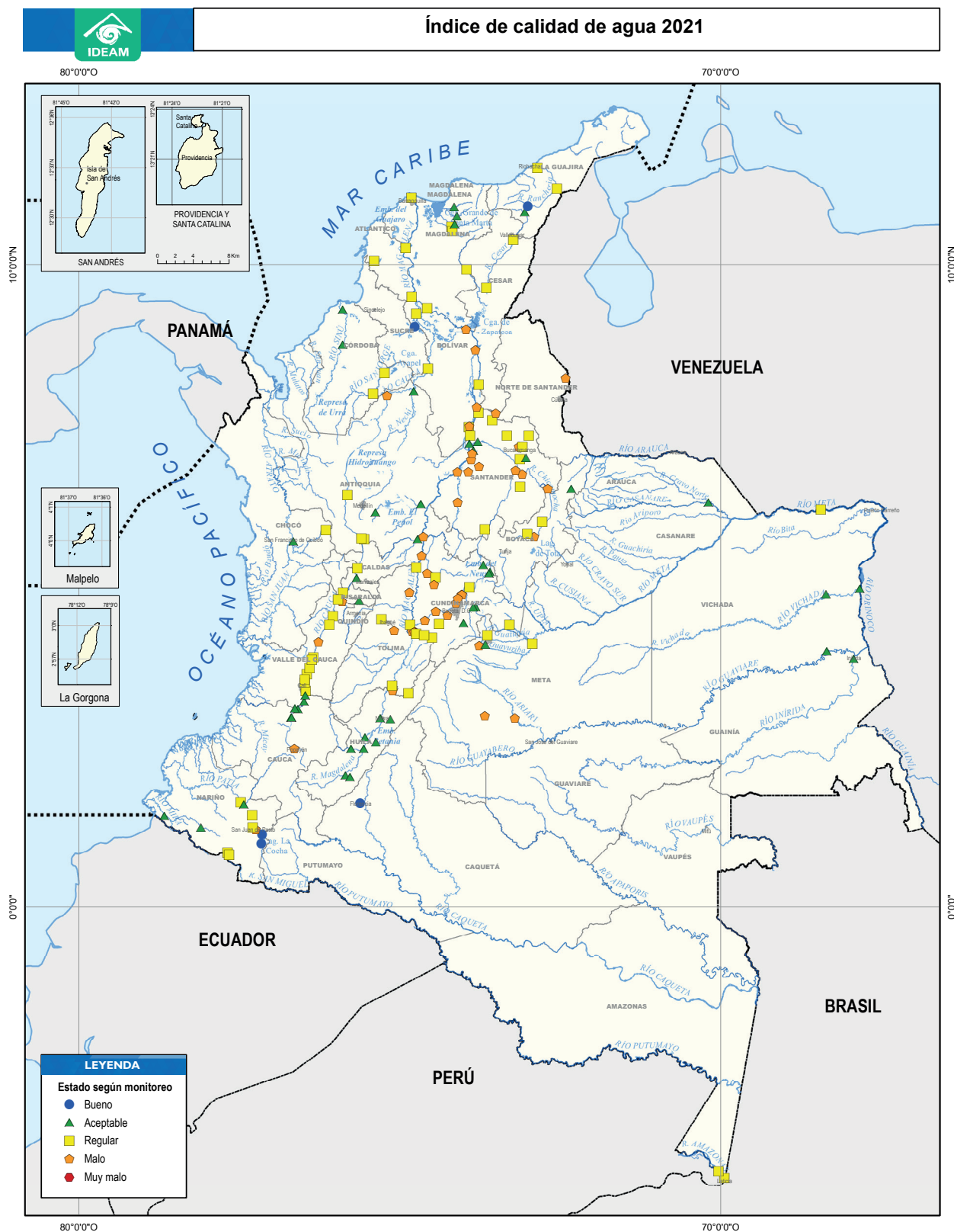
Magdalena-Cauca, el 5 % en los ríos del área Caribe, y el 17 % entre las áreas hidrográficas del Pacífico, Amazonas y Orinoquía.

De acuerdo con los resultados del ICA (monitoreos en 2021), dentro de la calidad del agua con descriptor “malo” se identifican 42 puntos en las corrientes: Bogotá, Magdalena, Lebrija, Opón, Pamplonita, Negro, Sogamoso, Villeta, Guayuriba, Güejar, La Vieja y Lagunilla, entre otras (puntos relacionados en la Tabla 67 del documento ENA 2022).

En el documento del ENA 2022, las figuras 229, 230, 231 y 232 muestran los resultados del índice de calidad del agua, desde el punto ubicado en la parte más alta hasta el ubicado en la parte más baja de los ríos Cauca, Magdalena, Bogotá y Chicamocha.

Presión sobre la calidad del agua

Para evaluar la presión sobre la calidad de agua se actualizan los estimativos de cargas contaminantes puntuales generadas, de las removidas y de las que, finalmente, son vertidas (carga neta) a los sistemas hídricos del país por las actividades sociales y productivas. Se hace el análisis de presiones por contaminación a partir de estas estimaciones y del índice de alteración potencial de calidad de agua (IACAL).



La estimación de carga contaminante se hace a partir de la actualización con datos de 2020 para los sectores doméstico (DANE, 2022) y de sacrificio de ganado (DANE, 2022); con base en la consulta generada en los capítulos de producto y materia prima de la Encuesta Anual Manufacturera (EAM). Se utilizan los mismos factores de vertimiento de la OMS manejados en los ENA anteriores. Para la carga vertida del sector doméstico se contó con la información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), actualizada en el SUI para el año 2020. La información de las cargas generadas y vertidas para el beneficio de café fue suministrada por la Federación Nacional de Cafeteros y Cenicafe.

Carga contaminante vertida a las fuentes hídricas

De los sectores usuarios del recurso hídrico considerados en el ámbito nacional para la evaluación de la calidad de agua (población, industria, sacrificio de ganado y beneficio de café), el sector industrial es el mayor aportante de carga orgánica neta que se vierte a las corrientes hídricas con un 56 % del total de carga (1.349.595 t/año) de DBO (de-

manda bioquímica de oxígeno) que aportan estos cuatro sectores, y con un 78 % del total de DQO (4.517.890 t/año). En el sector doméstico, el mayor aporte lo hacen los sólidos suspendidos totales con 75 % del total (1.350.208); y en cuanto a nutrientes, en fósforo total (PT) el aporte es del 92 % del total (42.703) y, en nitrógeno total (NT), es del 46 % del total (300.743), tal como se aprecia en el diagrama de barras de la Figura 54.

En cuanto al aporte de carga contaminante en términos de DBO, el 73 % de la carga con respecto al total nacional se concentra en 16 subzonas hidrográficas; estas subzonas son: arroyos directos al Caribe; río Bogotá; río Tota; río Lebrija y otros directos al Magdalena; río Guachal (Bolo-Fraile y Párraga); ríos Amaime y Cerrito; río La Vieja; río Otún y otros directos al Cauca; ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo; río Porce; río Pamplonita; río Palo; río Chinchiná; río Quinamayo y otros directos al Cauca; ríos Arroyohondo-Yumbo-Mulaló-Vijes-Yotoco; y directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura. Once subzonas hidrográficas representan el 50 % de la DBO en el sector doméstico y 85 % de la DBO en el de industria.

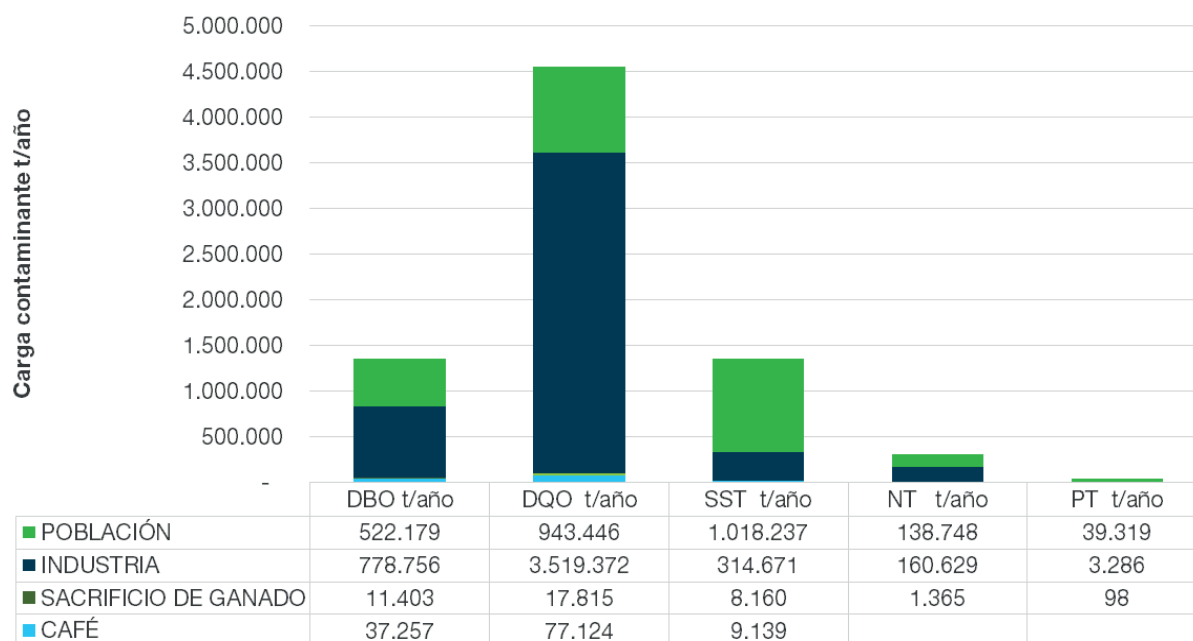


Figura 54. Carga contaminante potencialmente vertida a las corrientes hídricas (t/año) 2020.

El 84 % de la carga de DQO con respecto al total nacional se concentra en 15 subzonas hidrográficas: arroyos directos al Caribe; río Bogotá; río Totáre; río Lebrija y otros directos al Magdalena; río Guachal (Bolo-Fraile y Párraga); ríos Amaime y Cerrito; río La Vieja; río Otún y otros directos al Cauca; ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo; río Porce; río Opón; río Palo; río Quinamayo y otros directos al Cauca; ríos Arroyohondo-Yumbo-Mulaló-Vijes-Yotoco; y directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura. El vertimiento del sector doméstico de estas SZH asociadas con las principales ciudades alcanza el 57 % del total doméstico y 29 % del total industrial.

Cargas contaminantes generadas por los sectores usuarios del agua y removidas por sistemas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con la consulta y el análisis hechos para los sectores industria y población, y teniendo en cuenta las limitaciones en la información y la metodología presentada en el ENA 2022, se relacionan a continuación los estimativos de carga contaminante generada por estos sectores y removida por los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y vertida en las corrientes hídricas (Tabla 17).

Tabla 17. Carga contaminante generada por los sectores usuarios y removida en sistemas de tratamiento de aguas residuales, 2020.

Parámetro	Carga generada por población e industria (t/año)	Carga vertida por población e industria (t/año)	Cantidad removida (t/año)	% de remoción
DBO	2.492.628	1.300.935	1.191.693	48 %
DQO	8.677.576	4.462.818	4.214.758	49 %
SST	2.776.681	1.332.908	1.443.773	52 %
NT	330.297	299.377	30.920	9 %
PT	50.203	42.605	7.598	15 %

Para el año 2020, se contó con información de 354 municipios con plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

La carga de materia orgánica (DBO) tratada del sector doméstico en el 2020 fue de 390.071 t/año correspondiente al 43 % del total generado por este sector (912.250t/año). En DQO fue de 691.582 t/

año, que corresponde al 42 % del total generado (1.635.028t/año); y en SST se estimaron 957.464t/año, correspondientes al 48 % del total generado (1.975.702t/año).

En la Tabla 18, se muestran los porcentajes de remoción por parámetro en los sectores industrial y doméstico nacionales.

Tabla 18. Porcentajes de remoción de carga contaminante a nivel nacional, sectores industrial y doméstico, 2020.

Parámetro	Remoción industria (%)	Remoción doméstica (%)
DBO	51 %	43 %
DQO	50 %	42 %
SST	61 %	48 %
NT	2 %	17 %
PT	1 %	16 %

De acuerdo con la información reportada por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, en 2020 el caudal tratado por las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas fue de 33,7 m³/s y el porcentaje de aguas residuales tratadas en términos de caudal fue de 52,02 %.

Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL)

Al igual que en estudios anteriores, para el ENA 2022 se calculó el indicador de presión potencial por carga contaminante a la calidad del agua de los sistemas hídricos del país para condiciones hidrológicas medias y secas. En la Figura 55 se presentan los mapas con los resultados del indicador y su categoría por subzona hidrográfica (SZH).

En 2022 se encontraron 27 subzonas hidrográficas en categoría “muy alta” en condiciones de **año medio**. Estas subzonas se encuentran ubicadas en el área hidrográfica **Caribe** (arroyos directos al Caribe, Bajo Sinú, río Piedras-río Manzanares, río Ranchería, directos Caribe Ay Sharimahana Alta Guajira, río Carraipía Paraguachón, directos al golfo Maracaibo, río Pamplonita, San Andrés); y en el área hidrográfica **Magdalena-Cauca** (río Fortalecillas y otros; río Bogotá; río Totare; río Palo; río Guachal -Bolo Fraile y Párraga-; ríos Amaime y Cerrito; ríos Tuluá y Morales; río La Vieja; río Otún y otros directos al Cauca; río Chinchiná; río Quinamayo y otros directos al Cauca; ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo; ríos Arroyohondo-Yumbo-Mulaló-Vijes-Yotoco; ríos Guadalajara y San Pedro; quebradas Las Cañas-Los Micos y Obando; río Porce; Canal del Dique, margen derecho; directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura, ciénaga Mallorquín).

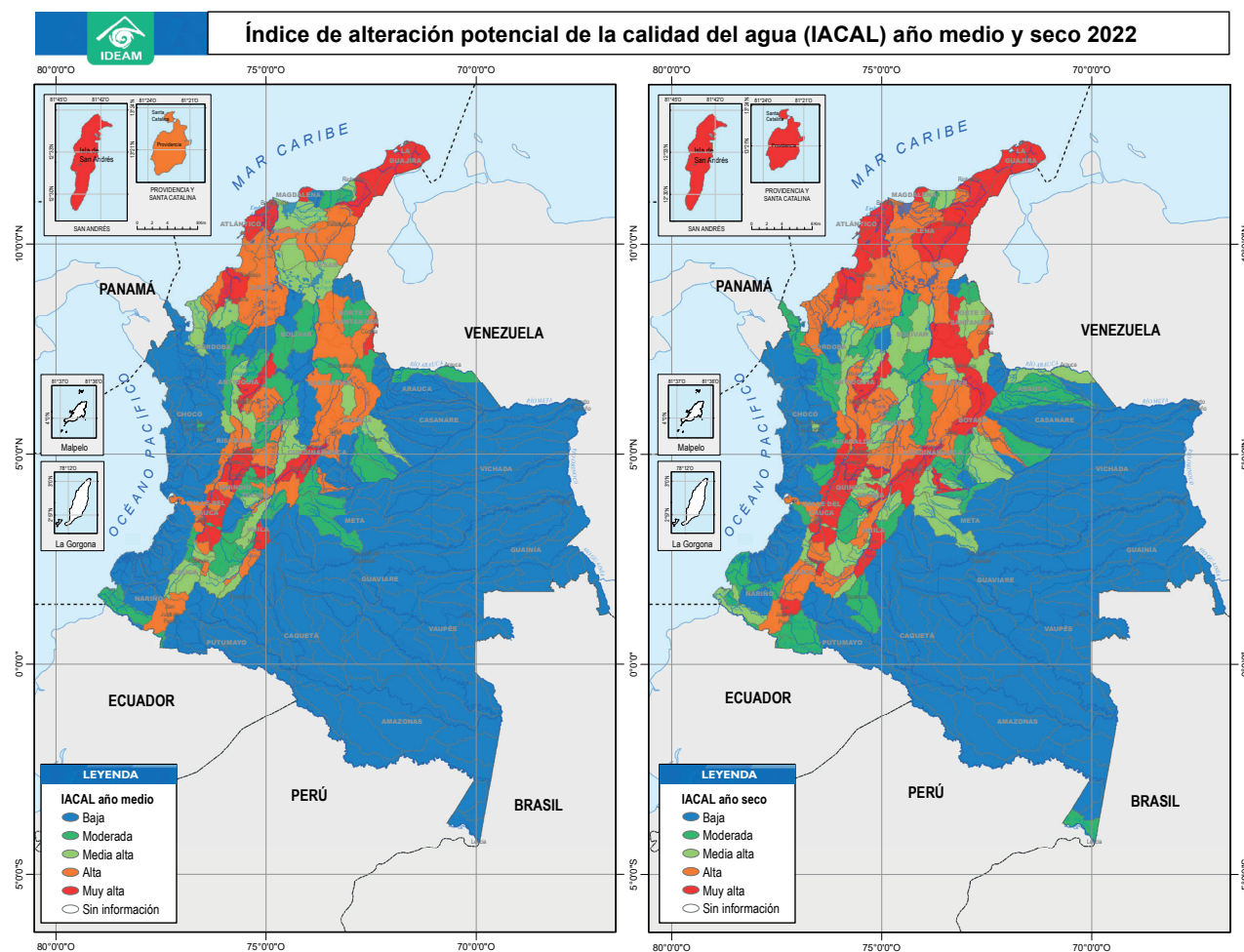


Figura 55. Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL) año medio y seco, 2022.

Para condiciones hidrológicas de año seco se encontraron 55 subzonas hidrográficas en categoría “muy alta” ubicadas en el área hidrográfica del **Caribe** (directos Caribe golfo de Morrosquillo; arroyos directos al Caribe; Bajo Sinú; río Piedras-río Manzanares; río Camarones y otros directos Caribe; río Ranchería; directos Caribe-Ay Sharimahana Alta Guajira; río Carraipía-Paraguachón y directos al golfo Maracaibo; río Pamplonita; río Algodonal (Alto Catatumbo); San Andrés; Providencia). También en el área hidrográfica del **Magdalena-Cauca** (río Chicamocha; Alto río Cauca; río Palo; ríos Pescador-RUT-Chanco-Catarina y Cañaveral; río Frío; río Risaralda, río Tapias y otros directos al Cauca; ríos Claro y Jamundí; ríos Guabas, Zabaletas y Sonso; río Bugalagrande; río Paila; Alto Cesar; Medio Cesar; río Ariguaní; directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (MI); Canal del Dique (MI). Y en

el área hidrográfica del **Orinoco** (las SZH de río Guatiquía y lago de Tota).

Uso de agroquímicos en la agricultura

En el 2020, la demanda potencial estimada en fertilizantes fue de 3.282.428 toneladas en presentación sólida y de 7.251.000 de litros en formulaciones líquidas. La fuente de información para estimar el potencial uso de agroquímicos es el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2021), que reporta la cantidad en toneladas y litros de los insumos químicos producidos, importados y exportados en Colombia. Metodológicamente, el cálculo realizado para el ENA corresponde al balance entre la cantidad de agroquímicos producidos, importados y exportados. En la Tabla 19 y en la Tabla 20, se presentan el consolidado del uso de agroquímicos para los años 2008, 2012, 2014, 2019 y 2020.

Tabla 19. Reporte de agroquímicos expresados en toneladas para los ENA 2010, 2014 y 2018, y para el año 2020.

Agroquímico	Cantidad (t) 2008	Cantidad (t) 2012	Cantidad (t) 2016	Cantidad (t) 2019	Cantidad (t) 2020
Fertilizantes	2.594.191	2.516.084	3.300.455	3.135.620	3.282.428
Herbicidas	11.768	11.770	2.553	12.427	9.506
Fungicidas	11.602	10.745	12.993	57.274	9.225
Insecticidas	3.512	5.056	4.132	7.967	5.247
Otros plaguicidas	9.169	3.132	146	77.992	24.097
TOTAL	2.630.242	2.546.785	3.320.278	3.291.279	3.330.503

Nota: los años presentados en la tabla corresponden a los años bases del ENA 2010 (año 2008), ENA 2014 (año 2012), ENA 2018 (año 2016) y ENA 2022 (años 2019 y 2020).

Fuente: elaboración propia a partir de Ideam (2010), Ideam (2015), Ideam (2019) y del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2021).

Tabla 20. Reporte de agroquímicos expresados en litros para los ENA 2010, 2014, 2018, y para el año 2020.

Agroquímico	Cantidad (miles de l) 2008	Cantidad (miles de l) 2012	Cantidad (miles de l) 2016	Cantidad (miles de l) 2019	Cantidad (miles de l) 2020
Fertilizantes	20.695	2.914	60.590	62.428	7.251
Herbicidas	16.238	25.225	25.789	7.126	29.850
Fungicidas	732	10.369	9.314	828	9.091

Agroquímico	Cantidad (miles de l) 2008	Cantidad (miles de l) 2012	Cantidad (miles de l) 2016	Cantidad (miles de l) 2019	Cantidad (miles de l) 2020
Insecticidas	4.664	5.783	8.011	2.390	8.160
Otros plaguicidas	8.861	14.698	579	11.994	5.407
TOTAL	51.191	58.989	104.284	84.766	59.759

Nota: los años presentados en la tabla corresponden a los años bases del ENA 2010 (año 2008), ENA 2014 (año 2012), y ENA 2022 (años 2019 y 2020).

Fuente: elaboración propia a partir de Ideam (2010), Ideam (2015), Ideam (2019) y del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2021).

Uso de sustancias químicas para la transformación de coca como uso ilícito

El uso de sustancias químicas para la transformación de la coca se soporta en las estadísticas que lleva la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito en el grupo del Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (SIMCI). En 2020, para un total de 154.930 hectáreas (UNODC, 2021) se estimó el uso de 55.736 (litros/kilos) de productos de agroquímicos para el control de malezas, de 1.720.758 (litros/kilos) de productos fertilizantes y de 81.947 (litros/kilos) de productos fungicidas.

El uso de sustancia químicas en los procesos de transformación en el contexto nacional en 2020 fue de 326.146 toneladas, conformadas en un 0,1 % por oxidantes fuertes, 0,6 % por ácidos, 2,5 % de bases y 96,8 % de solventes orgánicos.

En la Figura 56, se observa el aumento en el uso de sustancias químicas durante el 2020 (año base para el ENA 2022) con respecto al 2016 (año base para el ENA 2018). Durante los cuatro años de análisis del uso de sustancias químicas, solamente en el 2012 (año base para el ENA 2014) se registró una disminución en el uso.

Comparación de sustancias químicas empleadas en la transformación de la coca en Colombia 2010 - 2022

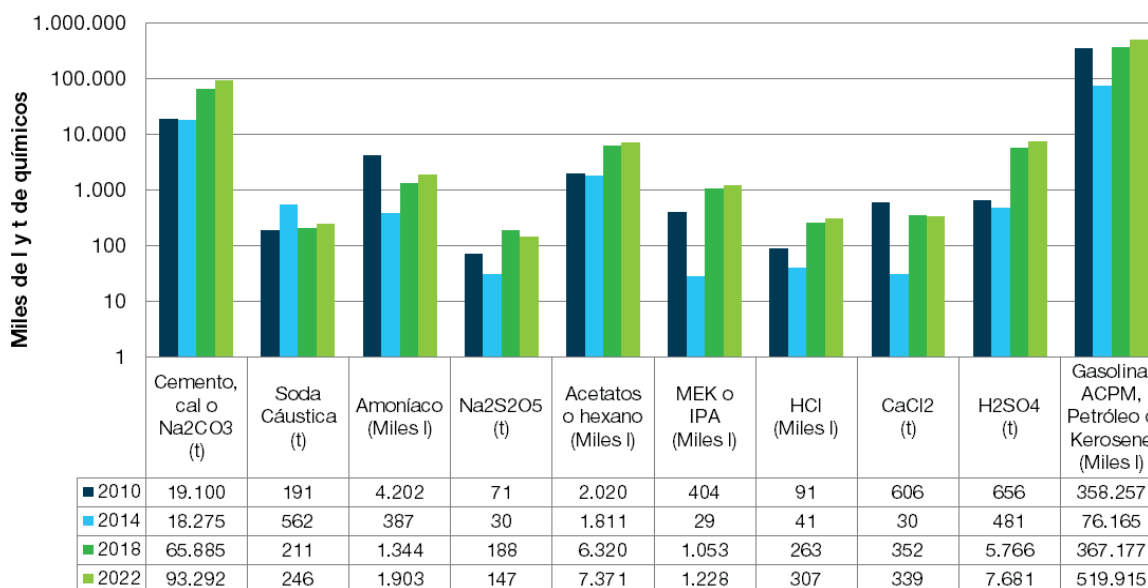


Figura 56. Comparación de sustancias químicas empleadas en la transformación de la coca en Colombia.

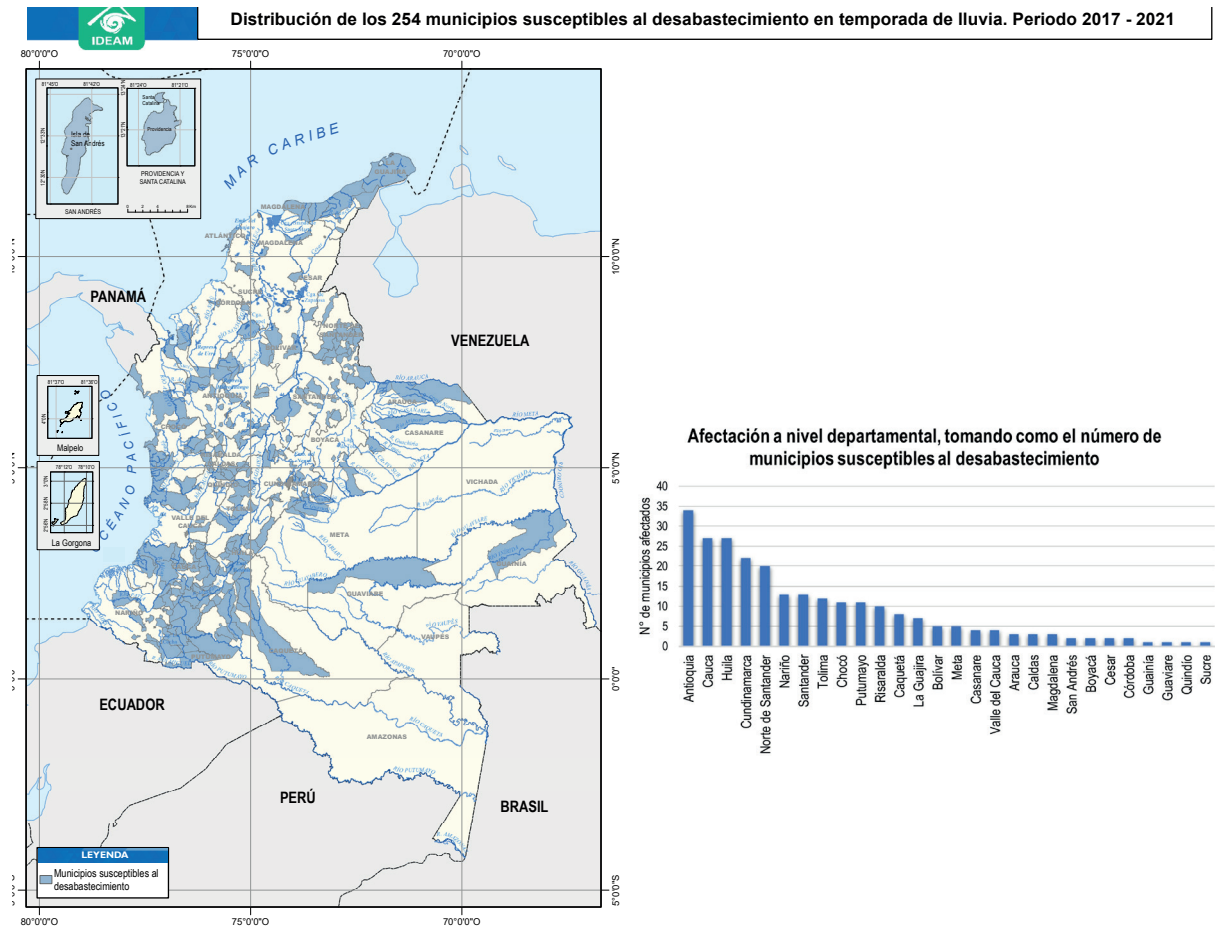


Figura 57. Municipios con reporte de uso de plaguicidas, Colombia, 2017-2021.

Fuente: Información Programa de vigilancia epidemiológica de plaguicidas organofosforados y carbamatos (VEO), 2017-2021. Dirección Redes en Salud Pública, INS.

Uso de plaguicidas en algunos departamentos de Colombia, 2017-2021

En el mundo, la fabricación de ingredientes activos de plaguicidas ha venido en aumento y, según el Banco Mundial, en Colombia el uso de plaguicidas de síntesis química se ha incrementado en un 360 % en los últimos 20 años, sin que exista una regulación que controle las sustancias más peligrosas.

En el marco de la legislación colombiana, los plaguicidas hacen parte de las sustancias de interés en salud pública. Las autoridades sanitarias realizan vigilancia en la población con riesgo de exposición. Además, el Programa de vigilancia epidemiológica de plaguicidas organofosforados y carbamatos (VEO) contribuye de igual manera a las actividades de la vigilancia sanitaria sobre la presencia de plaguicidas usados en las actividades agrícolas, cerca de las fuentes de abastecimiento de los sistemas de suministro de agua, para el levantamiento de los mapas de riesgo de la calidad del agua para consumo humano en el país.

En el ENA 2022, se actualiza la descripción de la frecuencia de uso de plaguicidas en individuos con riesgo de exposición a plaguicidas a nivel local y los datos sobre la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en los departamentos participantes de 2017–2021 en el país; se utiliza la información reportada al programa VEO del Instituto Nacional de Salud (INS), obtenida en 12 departamentos durante el periodo 2017 a 2021 con participación de 23.623 individuos con riesgo de exposición a plaguicidas (organofosforados y carbamatos).

Se recolectó información sobre el nombre y uso más frecuente de los plaguicidas; sobre los principales cultivos en los que se utilizaron; sobre los niveles de acetilcolinesterasa en sangre como biomarcador de exposición a dichos plaguicidas; y sobre los productos que más refirieron sembrar o producir, grupos de cultivos (transitorios y asociados) blanco de aplicación de los plaguicidas, según la clasificación citada en la Encuesta Nacional Agropecuaria DANE 2019.

Frecuencia de uso de plaguicidas

Para el periodo de análisis, 252 municipios reportaron información de plaguicidas al programa VEO

del INS; el 69,8 % de estos se encontraban en cinco departamentos: Boyacá (53 municipios), Nariño (47), Caldas (27), Sucre (26) y Meta (23 municipios). De los 64.456 registros de plaguicidas, los más frecuentemente usados correspondieron a los organofosforados, con el 30,8 % (19.844); seguidos por el grupo de ácido fosfónico con el 18,2 % (11.746) y otros compuestos clorinados con 13,1 % (8.433) y piretroides con el 10,7 % (6898). La participación de compuestos organoclorados disminuyó durante el periodo, pasando de 3,8 % (749) a 0,3 % (27).

Según las categorías de toxicidad de los plaguicidas, el mayor reporte correspondió a la categoría toxicológica de “moderadamente peligroso” (categoría II) con el 57,1 % (36.791) del total; a la que seguía el grupo de “ligeramente peligroso” (categoría III) con 23,5 % (15.175). También se observa que hubo una disminución del uso de plaguicidas de la categoría “sumamente peligrosa” (categoría Ia) con un 0,3 %, al igual que en la de los “muy peligrosos” (categoría Ib) con 5,6 %. Respecto a los principales cultivos blanco de aplicación de los plaguicidas reportados: el 22,9 % se dio en cultivos de calabacín; un 13,6 % en los de aguacate; 6,1 % en cultivos de melón; y 5,5 % en los de piña y marañón-merey. Respecto a los grupos de cultivos reportados por departamento, se registró un 55,6 % (20.733) para el grupo de hortalizas, verduras y legumbres; seguido por el grupo de frutales, con el 34,3 % (12.780); el de tubérculos y plátano con el 4,4 % (1.636); el 3,4 % (1.269) para el de cereales; y, finalmente, el grupo de árboles, flores y dispersos con el 2,3 % (850).

En relación con el objeto blanco para controlar, el mayor reporte corresponde a los insecticidas, con 53,2 % (34.259); luego los herbicidas, con 33,6 % (21.640); y después los fungicidas, con 12,6 % (8.086). En menor proporción, aquellos que quedan en la categoría de “otros”, que incluyen: coadyuvantes, desinfectantes, fertilizantes y biológicos, con el 0,5 % (317); y rodenticidas, con 0,1 % (43). Los departamentos con mayor reporte fueron: Caldas, con el 35,3 %; Antioquia (14,9 %) y Boyacá (8,4 %); mientras que los de menor reporte fueron Atlántico, Caquetá y Vichada, con menos del 3 % durante el periodo. Respecto a las zonas hidrográficas marcadas, se pudo determi-

nar un uso extendido de plaguicidas en las zonas focalizadas central o parte media del altiplano de la cuenca Magdalena-Cauca, seguidas del borde suroccidental de la cuenca Pacífico y Amazonas; y, en menor extensión, la cuenca Caribe y Orinoco (Figura 57).

En Colombia existían 2.822 plaguicidas con registro de venta, de los cuales había entre 5 y 40 marcas de elección comercial. De estos, había 714 registros (es decir, una cuarta parte del total) que se encontraban en la lista de plaguicidas en vigilancia en el mundo y eran causantes de la problemática de la contaminación por plaguicidas, particularmente del agua; los principales grupos químicos involucrados fueron los organofosforados, los organoclorados y los carbamatos. Para 2020, según mapa de riesgos de la calidad del agua, en el país siguieron reportándose, en su orden: plaguicidas organofosforados, ácido fosfónico, compuestos clorinados, piretroides, bipiridilos, tiocarbamatos, carbamatos y compuestos organoclorados.

El uso intensivo y extensivo de plaguicidas en actividades agrícolas, pecuarias y de control de vectores facilita su propagación. Un aspecto relevante es la generación y manejo inadecuado de residuos peligrosos como envases vacíos y bolsas con o sin aditivos, entre otros, que representan un riesgo de contaminación para las corrientes de agua natural de las vertientes hidrográficas del país. Durante el periodo de análisis fueron relevantes, en especial, las zonas hidrográficas con características de relieve de partes altas, medias bajas que captan agua y sedimentos de los tributarios de diferente orden, tales como nacimientos de agua, arroyos, quebradas y ríos, hasta desembocar en los ríos principales del país que dan origen a las cuencas mencionadas.

8. ¿En qué municipios hay susceptibilidad al desabastecimiento hídrico en temporada seca y de lluvia?

La susceptibilidad al desabastecimiento hídrico presentada en el ENA 2022 actualiza el análisis de

las afectaciones a los sistemas de abastecimiento de agua para la población a nivel municipal en temporada seca, complementadas con las afectaciones por la ocurrencia de eventos que son producto de la temporada de lluvia. Para ambas temporadas se muestra el consolidado de emergencias que, a nivel municipal para el periodo histórico 1998-2021, efectivamente han ocasionado deficiencias en la prestación del servicio de acueducto. En esta versión 2022, se realiza una evaluación del nivel de recurrencia de dichas afectaciones para el periodo 2017-2021 y el tipo de área (urbana, rural o mixta) que ha presentado problemas de desabastecimiento. Se hace el análisis de la potencialidad de uso de aguas subterráneas para los municipios con mayor susceptibilidad al desabastecimiento en época seca.

Como complemento, se realiza la delimitación de cuencas abastecedoras de acueductos para 72 municipios de Colombia, tomando como referencia aquellos que abastecen más de 5.000 suscriptores entre población rural y urbana. Para estas cuencas se estiman algunos de los indicadores del estudio, aquellos que permiten la resolución pertinente a este nivel de cuenca.

La estructura conceptual y metodológica de este componente se sustenta en los análisis presentados en versiones anteriores del Estudio Nacional del Agua (2014, 2018) y se entregan nuevos aportes que contribuyen a mejorar los resultados obtenidos y a reducir algunas incertidumbres.

Este componente permite a los tomadores de decisiones implementar acciones preventivas frente al desabastecimiento hídrico, asociado en especial con la ocurrencia de eventos hidroclimatológicos que traen consigo numerosas afectaciones; entre estas se destacan: la reducción de los niveles de las fuentes abastecedoras de los acueductos municipales a causa de la temporada seca; o la afectación, tanto en las fuentes hídricas de abastecimiento como en la infraestructura de los sistemas de acueducto, producida por la ocurrencia de eventos originados por la lluvia que desencadenan una insuficiencia de agua para satisfacer la demanda en el sector doméstico.

Susceptibilidad al desabastecimiento hídrico municipal

Los resultados obtenidos muestran afectaciones históricas correspondientes al periodo 1998-2021 en 565 municipios del territorio colombiano para temporada seca y en 835 municipios para temporada de lluvia. Con relación al periodo más reciente (2017-2021), las afectaciones se evidenciaron en 207 y 254 municipios en temporada seca y de lluvia, respectivamente.

A continuación, se muestran los resultados del análisis de municipios susceptibles al desabastecimiento para los dos periodos mencionados y se resalta la distribución de las afectaciones en ambas temporadas a nivel municipal, su recurrencia y el área de afectación. De la misma manera, se presentan los resultados de la evaluación de los indicadores relacionados con sequía y potencialidad de uso de aguas subterráneas para municipios susceptibles al desabastecimiento hídrico por temporada seca y los de erosión hídrica potencial en el caso de los municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia.

Municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca

Con base en la información disponible para el periodo 1998-2021, se cuenta con un listado de 565 municipios que han presentado afectaciones (al

menos en una ocasión) en la prestación del servicio de acueducto a causa de temporadas secas. La metodología usada para el ENA 2022 incluye la recopilación de nueva información que permite identificar la temporalidad y, de esta manera, tener una “línea base” para el seguimiento de las afectaciones que se presentan a nivel municipal. Es importante resaltar que, debido a los cambios metodológicos, los resultados obtenidos en los diferentes ENA no son comparables.

Para el periodo 2017-2021, se identificaron afectaciones en 207 municipios en el territorio nacional, los cuales están distribuidos en 16 departamentos. La Figura 58 representa los resultados obtenidos; allí se destaca que departamentos como Bolívar, Córdoba, La Guajira y Sucre han tenido afectaciones en la prestación de servicio de acueducto en al menos el 50 % de sus municipios. Además, se resalta que, para el periodo 2017-2021, se han visto afectadas siete capitales departamentales: Cartagena de Indias, Tunja, Valledupar, Montería, Riohacha, Santa Marta y Sincelejo.

Por otro lado, en los departamentos de Bolívar, Cesar, Córdoba y Santander se presentan categorías de recurrencia “alta”, es decir, en algunos de sus municipios se han reportado situaciones de desabastecimiento hídrico en más de dos años para el periodo 2017-2021. Adicionalmente, su área de afectación es mixta (urbana y rural), tal como se relaciona en la Tabla 21.

Tabla 21. Municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca con alta recurrencia y área de afectación urbana y rural.

Código municipio	Nombre departamento	Nombre municipio	Recurrencia	Área afectada (urbana, rural, mixta)
13549	Bolívar	Pinillos	Alta	Mixta
20060	Cesar	Bosconia	Alta	Mixta
23168	Córdoba	Chimá	Alta	Mixta
23419	Córdoba	Los Córdoba	Alta	Mixta
23574	Córdoba	Puerto Escondido	Alta	Mixta
23670	Córdoba	San Andrés de Sotavento	Alta	Mixta
23686	Córdoba	San Pelayo	Alta	Mixta
68051	Santander	Aratoca	Alta	Mixta
68418	Santander	Los Santos	Alta	Mixta



Departamentos con afectación en sus sistemas de abastecimiento a causa de temporadas secas. Período 2017 – 2021.

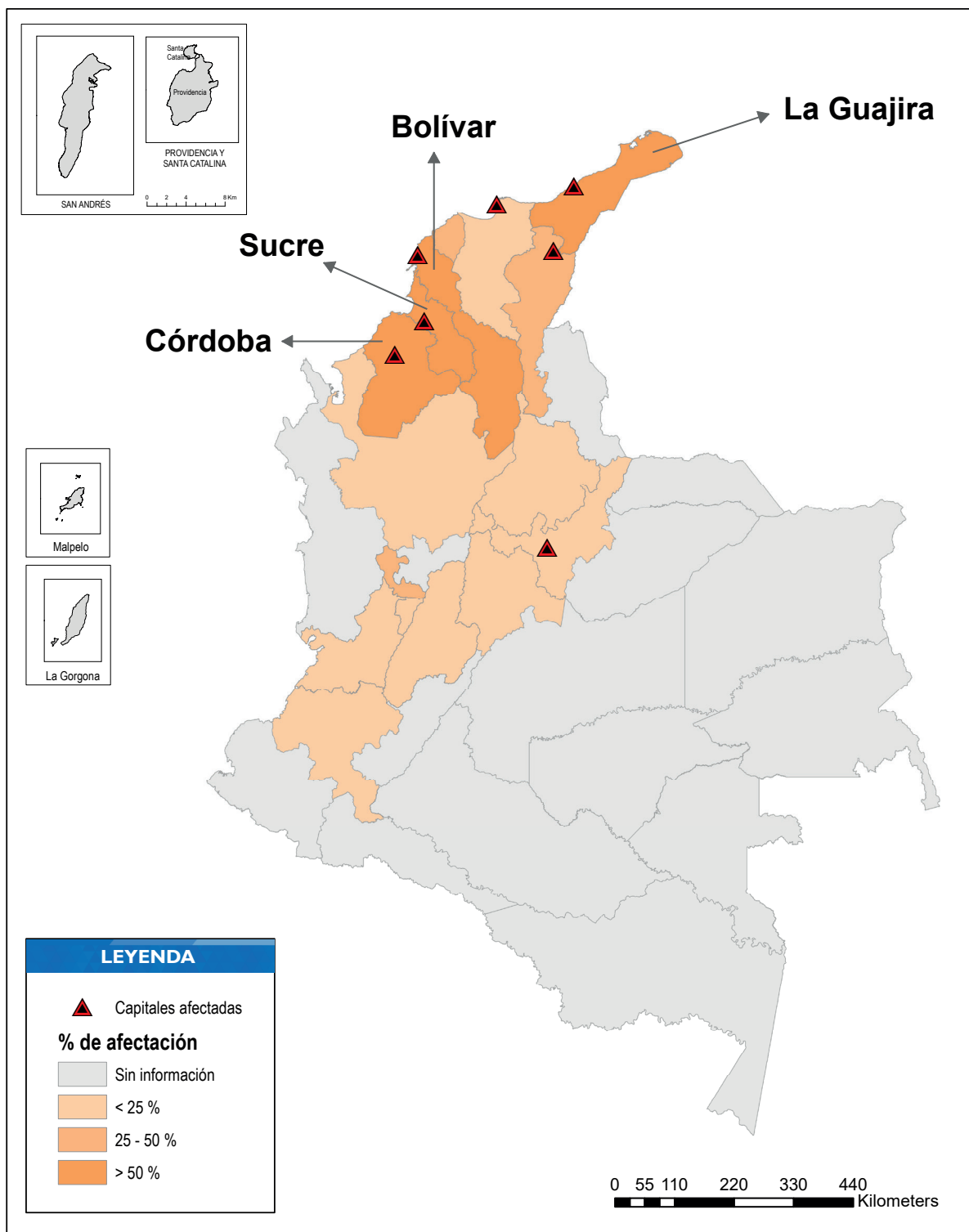


Figura 58. Departamentos con afectación en sus sistemas de abastecimiento a causa de temporadas secas. Período 2017-2021.

Igualmente, la evaluación de los impactos de la sequía en los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca se realizó tomando como referencia los resultados del índice multivariado de precipitación, humedad del suelo y escurrimiento (MSDIPreSmoEsc), con el propósito de identificar el grado de correspondencia entre la ocurrencia de eventos de sequía y la afectación

por desabastecimiento en estos municipios. Los resultados permiten concluir que el 79 % de los 207 municipios han presentado sequías en los años reportados con situaciones de desabastecimiento, mientras que el 21 % restante no registraron eventos asociados en la metodología de los índices de sequía o se encuentran dentro de la categoría normal (Figura 59).

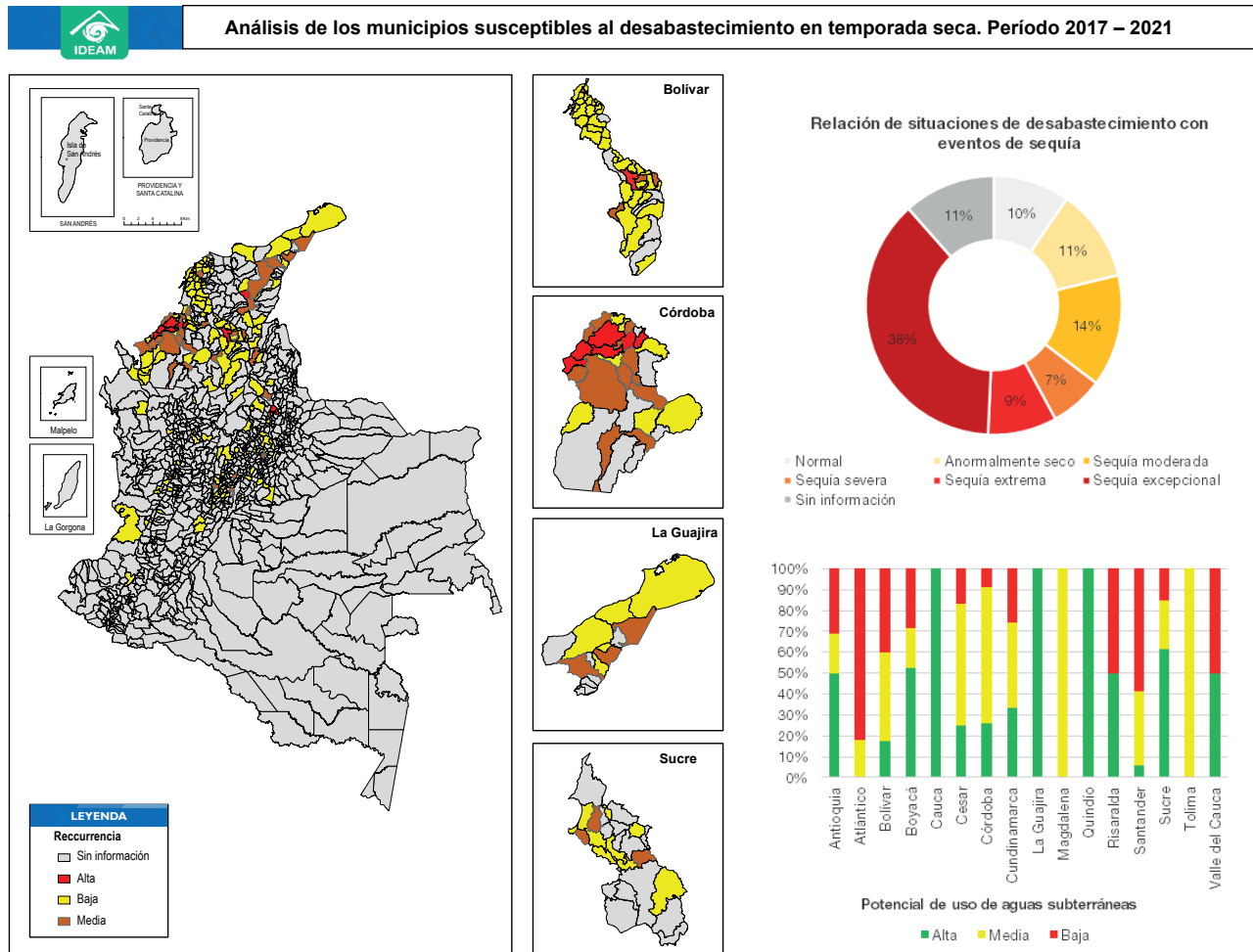


Figura 59. Análisis de los municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. Período 2017-2021.

Además de esto, tomando como referencia los avances descritos en el ENA 2018 (Ideam, 2019), se identificaron aquellos municipios que cuentan con suficiente información y conocimiento hidrogeológico para sugerir que pueden realizar el aprovechamiento del agua subterránea para su abastecimiento. A dichos municipios se les asignó una categorización de potencialidad de uso conjunto de agua superfi-

cial-agua subterránea (alta, media, baja), de acuerdo con el estado del conocimiento hidrogeológico (muy alto, alto, medio, bajo o muy bajo) de los sistemas acuíferos donde estos se encuentran.

El resultado de este análisis permitió concluir que el 34 % de los 207 municipios susceptibles cuentan con un alto potencial de uso conjunto de aguas

superficiales y subterráneas. Se resaltan los municipios de departamentos como Cauca, La Guajira y Quindío, en donde el 100 % de los municipios susceptibles localizados en ellos cuentan con un alto potencial de aprovechamiento de aguas subterráneas (Figura 59).

Municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia

Como novedad en el ENA 2022 se resalta la inclusión del listado de municipios susceptibles al desabastecimiento por la ocurrencia de eventos relacionados con lluvia a partir de la revisión de los consolidados anuales de emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2022) y el trabajo conjunto con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

En el periodo 1998-2021, se identificaron afectaciones en 835 municipios del territorio nacional susceptibles al desabastecimiento con base en la revisión de los consolidados anuales de las fuentes de información disponibles que han presentado, por lo menos, un evento por temporada de lluvia.

Se identifica que aproximadamente el 74 % del territorio nacional ha tenido afectaciones en los sistemas de acueducto por problemas derivados de la ocurrencia de eventos como crecientes súbitas, movimientos en masa, inundaciones, vendavales, tormentas eléctricas, avalanchas y avenidas torrenciales, entre otros. Esta clasificación incluye los municipios que han presentado problemas de desabastecimiento tanto por afectaciones en la fuente hídrica que surte el acueducto como por daños en la infraestructura.

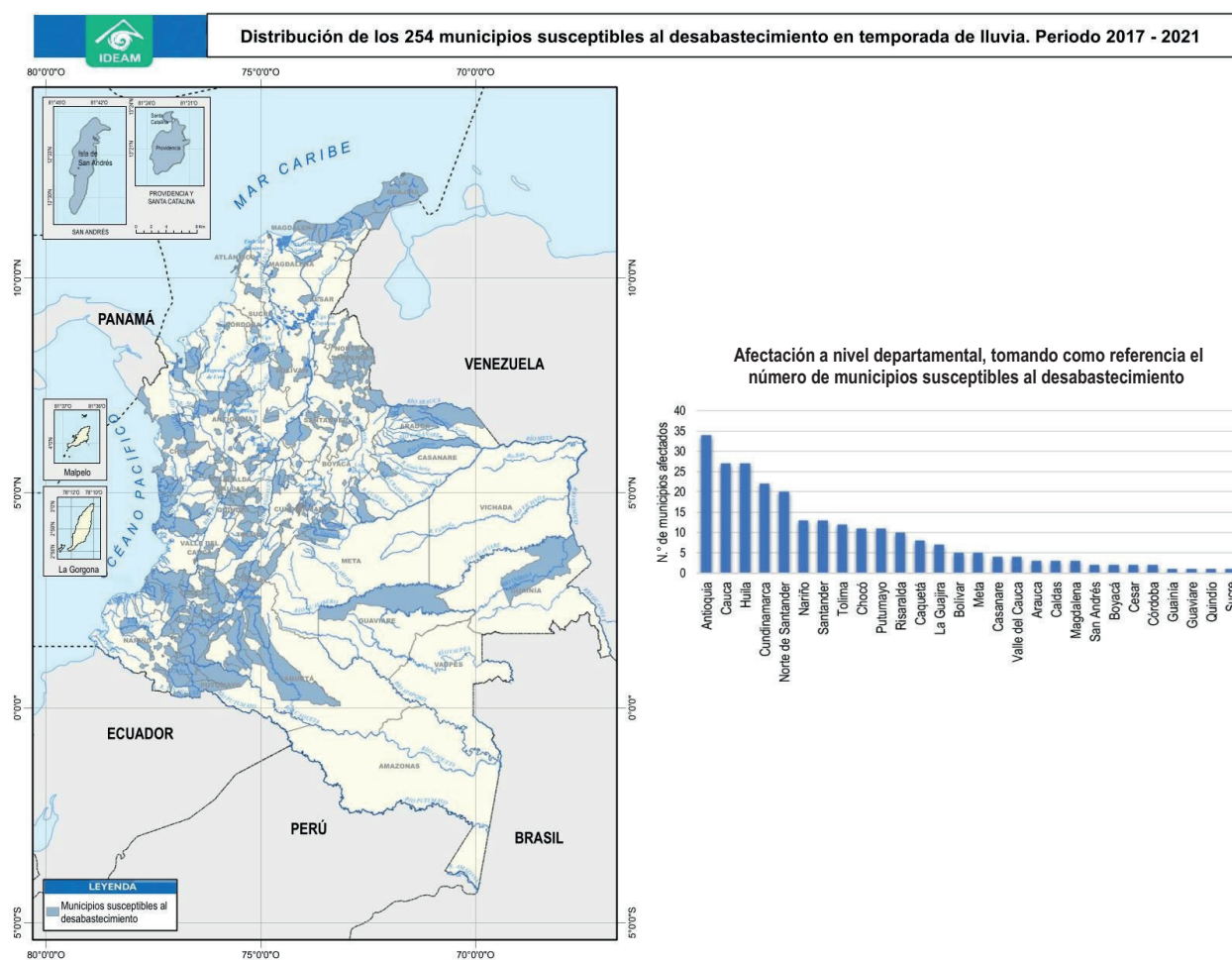


Figura 60. Distribución de los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021.

Para el periodo 2017-2021, se identificaron 254 municipios afectados, distribuidos en 28 departamentos. En la Figura 60, se relacionan los departamentos con más municipios afectados; las cinco primeras posiciones están ocupadas por Antioquia, Cauca, Huila, Cundinamarca y Norte de Santander. Además, para el mismo periodo, se han tenido afectaciones en 14 capitales departamentales que son: Arauca, San Andrés, Cartagena de Indias, Florencia, Inírida, San José del Guaviare, Neiva, Riohacha, Santa Marta, Villavicencio, Cúcuta, Mocoa, Pereira e Ibagué.

La Figura 61 muestra el número y tipo de eventos que se presentaron en los años comprendidos entre 2017 y 2021 y que generaron una afectación en la prestación del servicio de acueducto en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvias. En el año 2021 se evidencia que se tuvo la mayor cantidad de eventos asociados con lluvia, lo cual está directamente relacionado con el inicio del fenómeno de La Niña, que se empezó a consolidar en dicho año. Así mismo, se resalta que los acueductos son más susceptibles a las inundaciones, pues, para este periodo, son los eventos que mayores afectaciones han ocasionado.

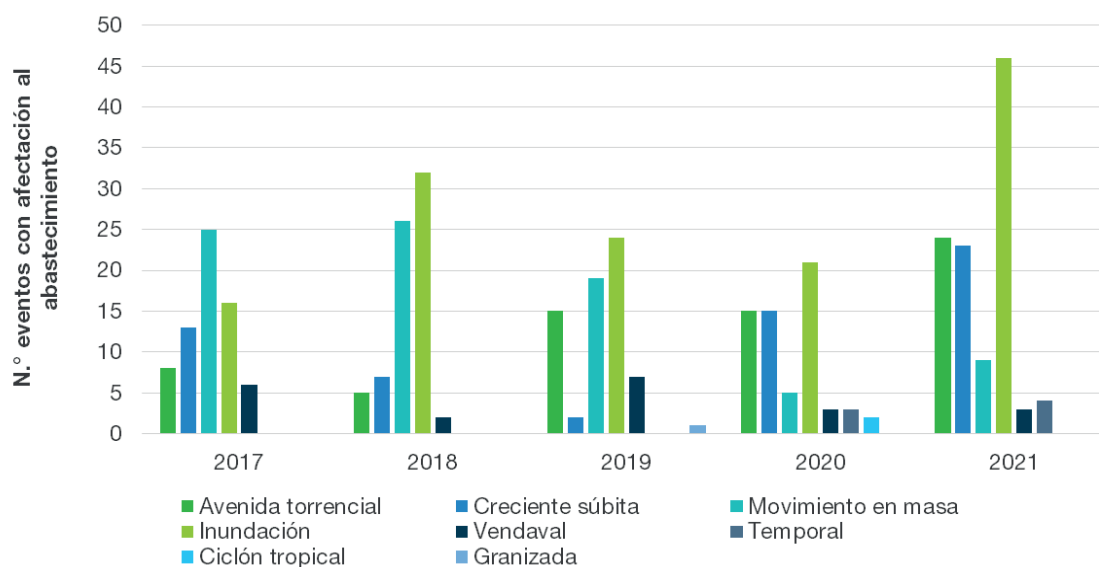


Figura 61. Eventos asociados con lluvia que ocasionaron afectaciones en el abastecimiento de los 254 municipios susceptibles.

Con respecto al nivel de recurrencia, las mayores afectaciones identificadas a la fecha se tienen en los departamentos de Caquetá, Cauca, Chocó, Huila, Meta, Norte de Santander, Putumayo, Risaralda y Tolima, que suman en conjunto 18 municipios con niveles de recurrencia altos en la afectación en su sistema de abastecimiento a causa de las temporadas de lluvia.

En cuanto al área en la que se ha presentado desabastecimiento, se pudo extraer información correspondiente de los consolidados anuales de emergencias de la UNGRD. Sin embargo, en los ca-

sos donde no se especificaba fue necesario asumir que la totalidad del municipio presentaba afectación. El análisis permitió identificar que el 54 % de estos municipios presentaron afectaciones en su área urbana y rural (mixta).

De la misma manera, en esta versión del ENA se incluye un análisis indicativo en función de las afectaciones que pueden tener los municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia por erosión hídrica potencial. Se resalta que el análisis de erosión hídrica potencial corresponde a un valor promedio estimado dentro del polígono

que corresponde a la división político-administrativa del municipio, y que la fuente de abastecimiento con su respectivo punto de captación no necesariamente se encuentra dentro. Los resultados per-

miten identificar que 137 municipios (54 %) de los 254 presentan condiciones entre “moderadas” y “muy severas” (Figura 62), lo cual los hace aún más vulnerables.

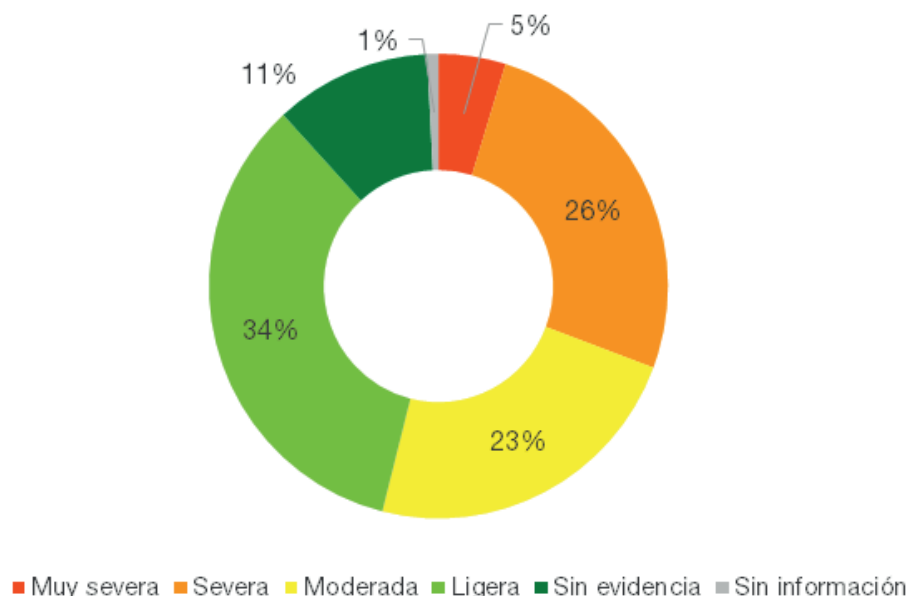


Figura 62. Erosión hídrica potencial en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia.

Por último, con base en los listados de municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca y de lluvia, en ambos casos se seleccionaron aquellos que han presentado afectaciones en la prestación del servicio de acueducto. Los resultados obtenidos están consignados en la Tabla 22, donde también se relaciona su potencialidad de uso de aguas subterráneas.

En este sentido, se evidencia que existen 28 municipios en el país con afectaciones en sus sistemas de abastecimiento en ambas temporadas analizadas; y, adicionalmente, que el 43 % de estos cuentan con condiciones que favorecen el aprovechamiento de aguas subterráneas para su abastecimiento de acuerdo con el nivel de conocimiento hidrogeológico de cada región (Ideam, 2019).

Tabla 22. Municipios susceptibles al desabastecimiento tanto en temporada seca como en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021.

Código DANE	Departamento	Municipio	Sistema acuífero asociado	Estado del conocimiento del sistema acuífero	Alternativa de uso conjunto (aguas superficiales - aguas subterráneas)
5030	Antioquia	Amagá	No identificado	Muy bajo	Baja
5045	Antioquia	Apartadó	SAM 5.1. Golfo de Urabá	Muy alto	Alta
5660	Antioquia	San Luis	No identificado	Muy bajo	Baja

Código DANE	Departamento	Municipio	Sistema acuífero asociado	Estado del conocimiento del sistema acuífero	Alternativa de uso conjunto (aguas superficiales - aguas subterráneas)
5837	Antioquia	Turbo	SAC 5.1. Golfo de Urabá	Muy alto	Alta
13074	Bolívar	Barranco de Loba	SAC 2.2. La Mojana	Medio	Media
13001	Bolívar	Cartagena de Indias	SAC 1.3. Arroyo Grande	Alto	Alta
			SAC 1.4. Turbaco	Medio	Media
13244	Bolívar	El Carmen de Bolívar	SAC 1.12. Maco	Bajo	Baja
			SAC 1.1. Morroa	Muy alto	Alta
			SAC 1.10. Tolú Viejo	Bajo	Baja
			SAC 2.1. Bajo Magdalena	Bajo	Baja
13458	Bolívar	Montecristo	SAC 2.2. La Mojana	Medio	Media
15681	Boyacá	San Pablo de Borbur	No identificado	Muy bajo	Baja
19532	Cauca	Patía	SAM 3.3. Cauca	Alto	Alta
			SAM 3.2. Patía	Alto	Alta
20032	Cesar	Astrea	SAC 2.1. Bajo Magdalena	Bajo	Baja
			SAC 4.1. Cesar	Alto	Alta
20383	Cesar	La Gloria	SAM 1.3. Abanico de Aguachica	Medio	Media
23068	Córdoba	Ayapel	SAM 6.5. Bajo Cauca antioqueño	Alto	Alta
			SAC 2.2. La Mojana	Medio	Media
23162	Córdoba	Cereté	SAC 1.9. Arenas Monas	Medio	Media
			SAC 1.7. Río Sinú	Medio	Media
25394	Cundinamarca	La Palma	No identificado	Muy bajo	Baja
25805	Cundinamarca	Tibacuy	SAM 4.6. Sabana de Bogotá	Alto	Alta
44430	La Guajira	Maicao	SAC 3.2. Alta Guajira	Alto	Alta
			SAC 3.1. Media Guajira	Muy alto	Alta
			SAC 4.2. Ranchería	Alto	Alta
44560	La Guajira	Manaure	SAC 3.2. Alta Guajira	Alto	Alta
			SAC 3.1. Media Guajira	Muy alto	Alta
44001	La Guajira	Riohacha	SAC 3.1. Media Guajira	Muy alto	Alta
			SAC 4.2. Ranchería	Alto	Alta

Código DANE	Departamento	Municipio	Sistema acuífero asociado	Estado del conocimiento del sistema acuífero	Alternativa de uso conjunto (aguas superficiales - aguas subterráneas)
44847	La Guajira	Uribe	SAC 3.2. Alta Guajira	Alto	Alta
			SAC 3.1. Media Guajira	Muy alto	Alta
47001	Magdalena	Santa Marta	SAC 1.11. Santa Marta	Medio	Media
66075	Risaralda	Balboa	SAM 3.1. Valle del Cauca	Muy alto	Alta
			SAM 6.1. Glacis del Quindío	Muy alto	Alta
66318	Risaralda	Guática	No identificado	Muy bajo	Baja
66440	Risaralda	Marsella	SAM 6.1. Glacis del Quindío	Muy alto	Alta
68255	Santander	El Playón	No identificado	Muy bajo	Baja
68432	Santander	Málaga	No identificado	Muy bajo	Baja
68689	Santander	San Vicente de Chucurí	SAM 4.7. Tablazo	Bajo	Baja
			SAM 1.1. Valle Medio del Magdalena	Muy alto	Alta
76250	Valle del Cauca	El Dovio	No identificado	Muy bajo	Baja

9. ¿Cuáles son las cuencas (subzonas hidrográficas) con problemas del agua en Colombia?

En este capítulo se presenta el análisis integrado del agua en Colombia en el marco del modelo básico de evaluación expuesto en el segundo capítulo del ENA 2022; es decir, enmarcado en las características de los procesos que se dan en el ciclo del agua, incluida la dinámica de sedimentos. Así mismo, se consideran las presiones relacionadas con procesos de transformación e intervención sobre el medio natural y las afectaciones que se producen en su dominio espacial y temporal.

Se analizan la variabilidad hídrica y las afectaciones a la oferta y la dinámica de las sequías y de los sedimentos. Así mismo, se analizan las afectaciones al agua por intervención antrópica en relación con las presiones por uso y contaminación y la transformación por actividades productivas de las zonas potencialmente inundables (ZPI). En el tema de riesgo, se evalúa la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico

para la población y para los sectores usuarios del recurso. De esta manera, se categorizan las 316 subzonas hidrográficas según su grado de criticidad.

El análisis integrado se realiza a partir de matrices de decisión que definen rangos de calificación para indicadores que se enmarcan en dos dominios temáticos, los cuales permiten una visión general de los diferentes niveles de evaluación del estado y la dinámica del agua y del recurso hídrico en Colombia. Estos dominios temáticos, que se ilustran en la Figura 63, son:

1. *Variabilidad hídrica y afectación de la oferta.* Este dominio está definido por los indicadores de coeficiente de variación de la oferta hídrica, rendimiento hídrico en condiciones hidrológicas promedio, índice multivariado de sequías (construido con las variables de precipitación, escorrentía y humedad del suelo) con agregación temporal de tres meses y el índice potencial de erosión hídrica.
2. *Afectaciones del agua por intervención antrópica.* Considera las presiones por uso (que invo-

lucran los indicadores de índice de uso del agua para condición de año seco, transformación de zonas potencialmente inundables y el índice presión hídrica a los ecosistemas); las presiones por contaminación (definidas por el índice de alteración potencial de la calidad del agua

para año seco, y presiones por producción y transformación de coca); y los indicadores de riesgo (considera el índice de vulnerabilidad al abastecimiento hídrico y el índice de desabastecimiento hídrico de la población en los municipios para condiciones hidrológicas extremas).

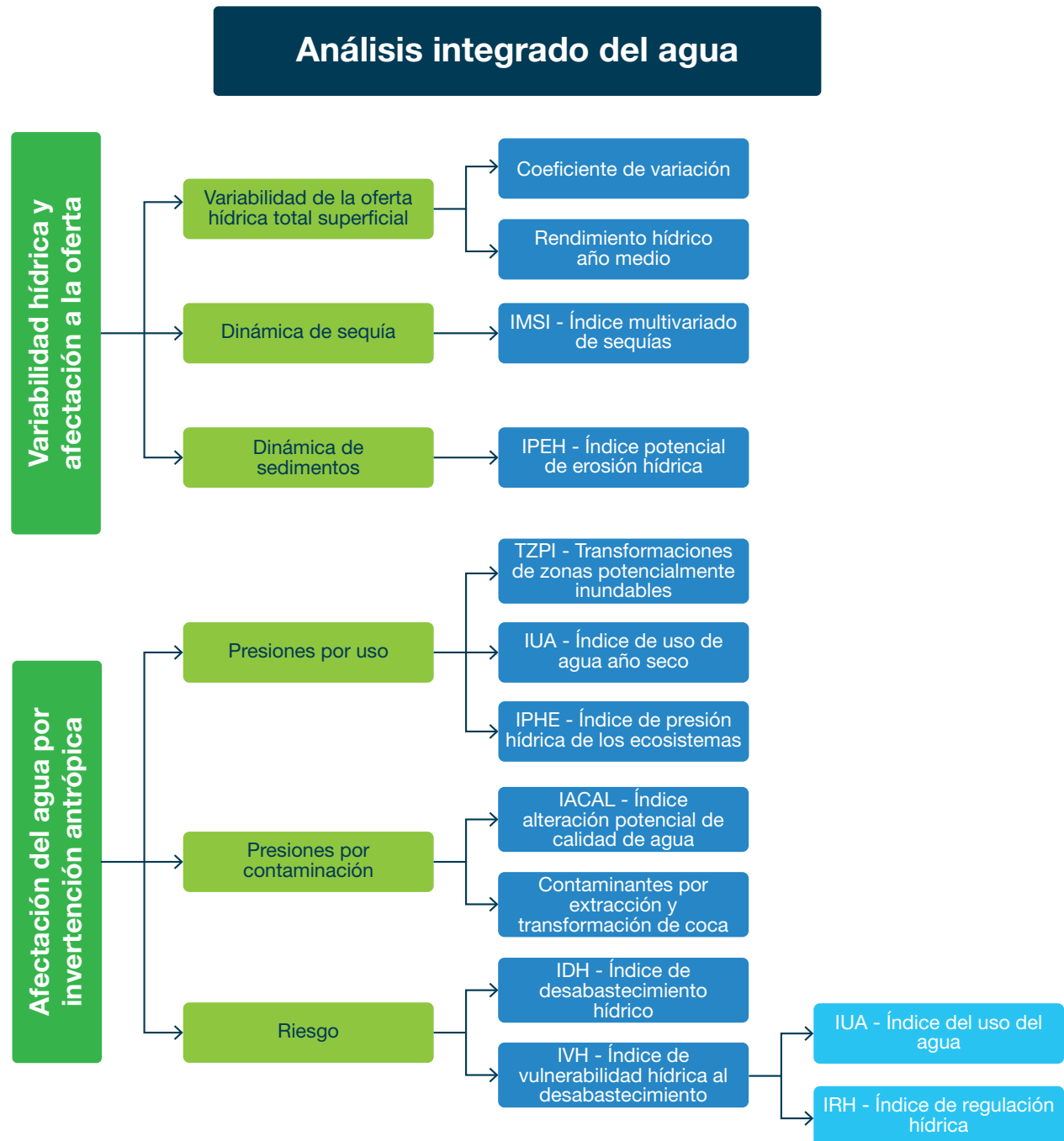


Figura 63. Dominios temáticos, componentes e indicadores del análisis integrado del agua.

El propósito de esta evaluación es identificar las SZH con mayor grado de criticidad. La evaluación por subzona hidrográfica se hace a partir de 11 índices e indicadores que satisfacen los seis grandes componentes temáticos, los cuales —a su vez— responden a los dominios mencionados y explicados en la parte inicial:

1. Variabilidad de la oferta hídrica natural
2. Dinámica de sequías
3. Dinámica de sedimentos
4. Presiones por uso
5. Presiones por contaminación
6. Elementos de riesgo asociados al desabastecimiento hídrico.

Con estos índices e indicadores —coeficiente de variación, rendimiento hídrico, índice multivariado de sequías, índice de erosión hídrica potencial efectiva, índice de uso del agua, transformación de zonas potencialmente inundables, índice de presión hídrica a los ecosistemas, índice de alteración potencial de la calidad del agua, uso de sustancias químicas para la producción y transformación de coca, índice de vulnerabilidad hídrica e índice de desabastecimiento hídrico municipal— se construye un algoritmo soportado en matrices de decisión y un panel de expertos que al final permite ponderar cada una de las variables. A continuación, se presenta el algoritmo de análisis integrado y sus variables correspondientes.

$$AI = 0,2*P1+0,2*P2+0,1*P3+0,18*P4+0,02*P5+0,05*P6+0,1*P7+0,1*P8+0,05*P9$$

- VOH -Ex (P1): variabilidad de la oferta hídrica total superficial.
- VRH-Ex (P2): variabilidad del recurso hídrico en condiciones extremas a partir de las presiones sobre la oferta hídrica natural, condición hidrológica de año seco (IUA) y variabilidad de esta oferta natural en esta condición extrema.
- IPHE (P3): índice de presión hídrica sobre los ecosistemas.

- IACAL (P4): índice de alteración potencial de la calidad de agua, condiciones de oferta hídrica año seco.
- (P5): uso de sustancias químicas por la producción y transformación de coca.
- EHPE (P6): erosión hídrica potencial en ladera de sedimentos.
- (P7): porcentaje de transformación de zonas potencialmente inundables.
- IMS (P8): índice multivariado de sequía, agregado a 3 meses.
- IACE (P9): índice de afectación al abastecimiento hídrico por condiciones hidroclimáticas extremas.

La ponderación de los factores P1 a P9 se realizó con base en los resultados temáticos, análisis de escenarios de prueba con panel de expertos y definición de categorías basado en percentiles. Esta ecuación se aplica a cada una de las SZH.

Los resultados de la evaluación integrada para cada subzona hidrográfica y su categoría para una condición hidrológica extrema se presentan en el Anexo 3.

El mapa de la Figura 64 muestra los resultados de la evaluación integrada e ilustra sobre las subzonas con diferentes grados de criticidad.

En la Tabla 23, se relacionan las subzonas por categoría de análisis integrado según el área hidrográfica.

Para condiciones hidrológicas extremas se identifican 103 subzonas hidrográficas en las que la evaluación integrada de los factores de variabilidad y afectación por intervención antrópica muestra las condiciones más críticas, con grados “Muy alto” y “Alto”. De estas, el 87 % se encuentra en las áreas hidrográficas del Caribe y Magdalena-Cauca, con 21 y 69 subzonas hidrográficas, respectivamente. En las siguientes tablas (Tabla 24 y Tabla 25) se relacionan las subzonas con categoría de análisis integrado “Muy alta” y “Alta”.

Tabla 23. Análisis integrado, subzonas por área hidrográfica y categoría de análisis.

Análisis integrado						
Categoría del análisis integrado	Número de subzonas por área hidrográfica					
	Amazonas	Caribe	Magdalena - Cauca	Orinoco	Pacífico	Total
Muy alta		9	19	1	3	32
Alta		12	50	7	2	71
Media	6	9	33	19	3	70
Baja	15	7	3	22	24	71
Muy baja	36	9		24	3	72
Total general	57	46	105	73	35	316

Tabla 24. Subzonas hidrográficas en categoría “muy alta” en condiciones hidrológicas extremas de año seco.

Categoría Muy alta de análisis integrado			
Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Código subzona hidrográfica	Subzona zona hidrográfica
Caribe	Caribe - Litoral	1204	Río Canalete y otros arroyos directos al Caribe
		1205	Directos Caribe golfo de Morrosquillo
		1206	Arroyos directos al Caribe
	Sinú	1302	Medio Sinú
		1303	Bajo Sinú
	Caribe - La Guajira	1505	Río Camarones y otros directos Caribe
		1506	Río Ranchería
	Catatumbo	1601	Río Pamplonita
		1605	Río Algodonal (Alto Catatumbo)
Magdalena - Cauca	Alto Magdalena	2102	Río Timaná y otros directos al Magdalena
		2110	Río Neiva
		2111	Río Fortalecillas y otros
		2112	Río Baché
		2120	Río Bogotá
	Cauca	2608	Ríos Pescador - RUT - Chanco - Catarina y Cañaveral
		2609	Ríos Amaime y Cerrito
		2610	Ríos Tuluá y Morales
		2617	Río Cartama y otros directos al Cauca

Categoría Muy alta de análisis integrado			
Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Código subzona hidrográfica	Subzona zona hidrográfica
Magdalena - Cauca	Cauca	2636	Río Paila
		2637	Quebradas Las Cañas - Los Micos y Obando
	Cesar	2802	Medio Cesar
		2804	Río Ariguaní
	Bajo Magdalena	2901	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (MI)
		2902	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (MD)
		2903	Canal del Dique margen derecho
		2904	Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura
		2908	Ríos Chimuica y Corozal
		2909	Ciénaga Mallorquín
Orinoco	Meta	3516	Lago de Tota
Pacífico	Patía	5202	Río San Jorge
		5203	Río Mayo
		5204	Río Juanambú

Tabla 25. Subzonas hidrográficas en categoría “alta” en condiciones hidrológicas extremas de año seco.

Categoría Alta de análisis integrado			
Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Código subzona hidrográfica	Subzona zona hidrográfica
Caribe	Caribe - Litoral	1201	Río León
		1202	Río Mulatos y otros directos al Caribe
		1203	Río San Juan
	Caribe - Guajira	1501	Río Piedras - río Manzanares
		1503	Río Ancho y otros directos al Caribe
		1504	Río Tapias
		1507	Directos Caribe - Ay Sharimahana Alta Guajira
		1508	Río Carraipía - Paraguachón, directos al golfo Maracaibo
		1509	Río Guachaca - Mendiguaca y Buritaca

Categoría Alta de análisis integrado			
Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Código subzona hidrográfica	Subzona zona hidrográfica
Caribe	Catatumbo	1602	Río Zulia
		1603	Río Nuevo Presidente - Tres Bocas (Sardinata, Tibú)
		1604	Río Tarra
Magdalena - Cauca	Alto Magdalena	2103	Río Suaza
		2104	Ríos directos al Magdalena (mi)
		2106	Ríos directos Magdalena (md)
		2108	Río Yaguará y río Iquira
		2109	Juncal y otros ríos directos al Magdalena
		2113	Río Aipe, río Chenche y otros directos al Magdalena
		2115	Directos Magdalena entre ríos Cabrera y Sumapaz
		2116	Río Prado
		2119	Río Sumapaz
		2121	Río Coello
		2124	Río Totare
		2125	Río Lagunilla y otros directos al Magdalena
	Saldaña	2203	Medio Saldaña
		2207	Río Cucuana
		2208	Bajo Saldaña
	Medio Magdalena	2303	Directos al Magdalena entre ríos Seco y Negro (md)
		2304	Directos Magdalena entre ríos Guarín y La Miel
		2305	Río La Miel (Samaná)
		2308	Río Nare
		2311	Directos al Magdalena Medio entre río Negro
		2319	Río Lebrija y otros directos al Magdalena
		2321	Quebrada El Carmen y otros directos al Magdalena
	Sogamoso	2401	Río Suárez
		2403	Río Chicamocha
		2405	Río Sogamoso

Categoría Alta de análisis integrado

Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Código subzona hidrográfica	Subzona zona hidrográfica
Magdalena - Cauca	Bajo Magdalena-Cauca -San Jorge	2502	Bajo San Jorge - La Mojana
	Cauca	2601	Alto Río Cauca
		2604	Río Palo
		2607	Río Guachal (Bolo - Fraile y Párraga)
		2611	Río Frío
		2612	Río La Vieja
		2613	Río Otún y otros directos al Cauca
		2614	Río Risaralda
		2615	Río Chinchiná
		2622	Río Desbaratado
		2627	Río Piendamó
		2628	Río Quinamayo y otros directos al Cauca
		2629	Ríos Claro y Jamundí
		2630	Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo
		2631	Ríos Arroyohondo - Yumbo - Mulalo - Vijes - Yotoco
		2632	Ríos Guabas, Zabaletas y Sonso
		2633	Ríos Guadalajara y San Pedro
		2634	Río Cali
		2635	Río Bugalagrande
	Nechí	2701	Río Porce
	Cesar	2801	Alto Cesar
		2805	Bajo Cesar
	Bajo Magdalena	2905	Canal del Dique margen izquierda
		2906	Ciénaga Grande de Santa Marta
		2907	Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato
Orinoco	Meta	3503	Río Guatiquía
		3504	Río Guacavía
		3507	Río Garagoa
		3510	Río Negro
		3518	Río Túa y otros directos al Meta (mi)
		3521	Río Cravo Sur

Categoría Alta de análisis integrado			
Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Código subzona hidrográfica	Subzona zona hidrográfica
Orinoco	Arauca	3705	Río Banadia y otros directos al río Arauca (md)
Pacífico	Patía	5201	Río Patía Alto
		5205	Río Guáitara

Acorde con el esquema básico aplicado para el análisis y evaluación integrada, se tiene como resultado la identificación de zonas del país con niveles diferentes de conservación, alteración o cambios que afectan la disponibilidad, la variabilidad, la regulación y la calidad de agua superficial y subterránea. Este análisis permite, además, reconocer las zonas donde diferentes aspectos temáticos requieren especial atención y focalización de acciones específicas o donde se presentan niveles de criticidad asociados con uno o varios aspectos analizados. Estos niveles de criticidad están asociados más que todo con altas presiones por uso con respecto de la oferta disponible y su variabilidad por cargas contaminantes a las fuentes y la erosión hídrica potencial efectiva. Como puntos importantes en la evaluación se incluyen: los factores asociados con los eventos de sequía a tres meses a partir de los índices multivariados y la susceptibilidad al desabastecimiento hídrico en temporada seca y húmeda.

El análisis integrado se soporta en matrices con categorías desde “Muy baja” hasta “Muy alta” o crítica para cada uno de los elementos temáticos mencionados para la evaluación. Con base en los resultados del análisis temático y el conocimiento experto, se establecen factores de ponderación y categorías para el modelo que integra estos factores.

El análisis de los resultados permite determinar —a escala nacional— el estado, la dinámica y las afectaciones al agua e identificar a nivel de subzona hidrográfica condiciones críticas de disponibilidad y de calidad del agua para diferentes condiciones hidrológicas.

De esta manera, se cuenta con una herramienta de análisis integral que permite reconocer las subzonas

hidrográficas donde se concentra la problemática del agua asociada a la variabilidad hídrica, a la afectación a la oferta y a la afectación del agua por intervención antrópica. Como era de esperarse, el mayor peso específico recae sobre la cuenca Magdalena-Cauca en las dos últimas tablas presentadas.

10. Consideraciones sobre la evaluación nacional del agua en Colombia

Para el ENA 2022 se realizaron importantes mejoras e innovaciones:

- Resultados con mayor resolución espacial y temporal en la oferta y disponibilidad hídrica a partir de la modelación a escala diaria.
- Gracias a la resolución espacial y temporal de los análisis y productos sobre la dinámica de sedimentos, es posible usarlos en escalas de mayor detalle y en estudios específicos de cuencas hidrográficas. De esta forma, pueden ser de utilidad en planes de ordenamiento territorial, en planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y en estudios de cuencas y microcuencas abastecedoras de acueductos, entre otros usos.
- Se mejoró de manera ostensible el conocimiento y caracterización de eventos de sequía considerando análisis univariados y multivariados de series de tiempo de precipitación, escorrentía y humedad del suelo. Esta innovación permite caracterizar la frecuencia e intensidad de eventos por sequías meteorológicas, agrológicas e hidrológicas, lo que abre una ventana de oportuni-

des para la predicción y seguimiento oportuno de estos eventos.

- En este Estudio, se ilustra la relevancia de las técnicas isotópicas aplicadas a la hidrología. De hecho, se presentan antecedentes y aplicaciones desarrolladas en Colombia con diferentes propósitos: identificación de zonas de recarga de acuíferos; datación de aguas subterráneas; dirección de flujos y conexiones de agua superficial-agua subterránea (conexión hidráulica río-acuífero); análisis de fuentes de contaminación en aguas superficiales y subterráneas. Es importante extender el uso de técnicas isotópicas para analizar, complementar y validar modelos climáticos, hidrológicos e hidrogeológicos, así como para estudios de variabilidad y cambio climático. Se hace necesario difundir e ilustrar sobre el uso y bondades de estas técnicas para estudiar y validar los flujos y procesos del ciclo del agua y, de manera particular, su importancia para abordar y validar estudios hidrogeológicos.

Adicionalmente, se identificaron áreas de conocimiento que requieren de esfuerzos institucionales nacionales y regionales para mejorar el dominio de los datos y la información necesaria para soportar la toma de decisiones y la respuesta de herramientas con poder de predicción y anticipación que se desarrollan con modelación matemática:

- Persiste la necesidad de fortalecer el monitoreo y evaluación de las aguas subterráneas. El monitoreo es incipiente, de tal manera que solo se monitorean de manera periódica, permanente y sistemática el 15 % de los sistemas acuíferos identificados en el país. Además, es necesario ampliar la cobertura y detalle de los modelos hidrogeológicos conceptuales; las escalas de conocimiento aún son insuficientes para garantizar un aprovechamiento sostenible del potencial de aguas subterráneas en ambientes sedimentarios e ígneos con porosidad primaria o secundaria que se prioricen o se consideren estratégicos en el marco del Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB). En este sentido, se deben mejorar: la resolución de la escala espacial de modelos geológicos con métodos directos e

indirectos; los inventarios de puntos de aguas subterráneas (pozos, aljibes y manantiales); los balances hídricos, delimitación de zonas de recarga y su cuantificación; las caracterizaciones hidráulicas con pruebas de bombeo de larga duración; la caracterización de fondos hidrogeoquímicos e isotópicos; y los escenarios de uso y proyecciones de uso conjunto con agua superficial, con enfoque integral que involucre la variabilidad y el cambio climático.

- Es necesario establecer el estado del arte en el conocimiento de los servicios ecosistémicos brindados por los ambientes acuáticos en Colombia (en especial, los asociados con los cuerpos de agua lénticos); hacerlo se convierte en una necesidad imperiosa en un territorio con tan alta vulnerabilidad ambiental y social, y que se encuentra en continuo desarrollo. Es prioritario continuar desarrollando investigación, lo mismo que seguir implementando acciones y estrategias para la recuperación y conservación de ciénagas, lagos, lagunas y humedales, usando enfoques ecohidrológicos y socioecológicos para mejorar la salud de los ecosistemas y la calidad de vida de las poblaciones asentadas en estos territorios.
- Este Estudio abre ventanas de oportunidad para la predicción, gestión de riesgo y optimización de sistemas de alerta temprana para sequías, inundaciones y crecientes súbitas generadas por eventos extremos que afectan una gran parte de la población, que tengan efectos mitigables con enfoques de ordenamiento territorial alrededor del agua. Para que se logre una mejor cuantificación del cambio real que han venido sufriendo las zonas potencialmente inundables a través del tiempo —ya sea de manera natural o debido a actividades antrópicas relacionadas con procesos graduales en el cambio del uso del suelo—, es necesario contar con los insumos actualizados a escalas de mayor detalle para renovar los mapas de Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia y el de Coberturas de la tierra con el propósito de disminuir la incertidumbre sobre las dinámicas y perturbaciones de zonas potencialmente inundables.

- En cuanto a la calidad del agua, es importante ampliar la cobertura nacional y regional de monitoreo de referencia de calidad del agua y propiciar una estrategia nacional para dimensionar las cargas contaminantes en sistemas hídricos de los municipios y subzonas hidrográficas. Asimismo, mejorar el conocimiento sobre la dinámica y efectos del uso de agroquímicos en las diferentes unidades de análisis hidrográfico, y consolidar estadísticas robustas de las relaciones entre calidad del agua y salud de humanos y ecosistemas. De igual manera, se requiere implementar sistemas de monitoreo en línea con base en las experiencias recientes del Ideam.
- Se evidencia la necesidad de mejorar de manera significativa el monitoreo de sedimentos en el territorio nacional. El estudio identificó que las zonas en las que se cuenta con valores mayores de erosión hídrica potencial, relación de entrega en ladera y rendimiento de sedimentos estimado en estaciones, y con balance de sedimentos corresponden a zonas donde se tienen valores altos de escorrentía, suelos con alta erodabilidad, altas pendientes y amplias áreas en coberturas de cultivos y pastos sin prácticas de conservación del suelo. Las zonas de depósito potencial se caracterizan por valores bajos de relación de entrega en ladera y rendimiento de sedimentos estimado en estaciones y con balance de sedimentos. La característica principal de estas zonas son las bajas pendientes. La mejora continua de estos modelos, así como el reconocimiento de dinámicas de sedimentos por pérdidas de suelos en las partes altas de las cuencas por malas prácticas de manejo tendrá mejores oportunidades si se cuenta con datos de monitoreo permanente, periódico y sistemático.
- En vista de la importancia del sistema glaciar colombiano como indicador de cambio climático en la zona ecuatorial, así como de la dinámica hídrica en la alta montaña colombiana que aporta gran parte del agua que demanda la población, es preciso mantener y expandir los sistemas y las redes de monitoreo dada la diversidad geográfica de la alta montaña, con el fin de comprender las relaciones hídricas, más que todo entre el páramo y el bosque altoandino.
- Hay regiones no instrumentadas y con difícil acceso que requieren estrategias de monitoreo y evaluación complementaria con sensores remotos, hidroestimadores y bases de datos globales que deben considerarse en los sistemas de observación, medición y vigilancia nacional y regional.
- La mejora continua de la información base en cantidad, calidad y cobertura abre una oportunidad asociada a la responsabilidad de los usuarios directos del agua y de los sectores de generar protocolos estables para la captura y el análisis de información sectorial; esta debe estar disponible para el correcto análisis territorial y posterior toma de decisiones orientadas a mejorar los indicadores de estado, presión y riesgo de los territorios. Aún son notorias las debilidades en la estabilidad de las metodologías, en la robustez de las estadísticas y en el subregistro en los reportes de uso del agua, reportes generados en instrumentos del SINA como el SIRH y el RUA y las bases de datos de las tasas por uso del agua. Persiste la necesidad de consolidar y unificar fuentes, y de mejorar la coherencia y estabilidad metodológica y conceptual en las fuentes de información oficial y disponible sobre los usos sectoriales del agua.
- Es importancia contar a escala nacional con una base de datos interinstitucional detallada, estructurada y estandarizada que permita robustecer los análisis sobre la susceptibilidad al desabastecimiento hídrico de las poblaciones y sobre las afectaciones presentadas en el nivel municipal por la ocurrencia de eventos hidrológicos, en particular, sobre la prestación del servicio de acueducto. Así mismo, es necesario avanzar con la información sectorial con la caracterización de las cuencas y los sistemas acuíferos que abastecen los acueductos.
- En el ENA se identifica el reúso del agua, el uso conjunto de agua superficial-agua subterránea y la recarga artificial como potenciales actividades que podrían generar alto impacto en la condición de presión por uso de agua de un territorio. No obstante, aún no existe información consolidada respecto del nivel de implementación de

procesos de circularidad en el uso de agua. Esta información será de alta relevancia para futuros estudios nacionales del agua y para el análisis a escala regional.

- Persiste la necesidad de mejorar en los niveles nacional y regional las plataformas de gestión de datos y los sistemas de información para garantizar interoperabilidad, oportunidad y calidad de la información entre las entidades del SINA. Esto ya supone la implementación de nuevas tecnologías que permitan manejar y gestionar altos volúmenes de información de manera eficiente y con oportunidad de uso para cualquier usuario o responsable de toma de decisiones en el marco de la GIRH (Gestión Integrada del Recurso Hídrico).

El análisis integrado del ENA 2022 permite establecer relaciones entre los diferentes indicadores definidos en este estudio para evaluar el estado, la dinámica del agua, así como las presiones por uso y afectaciones. Este análisis puede servir de insumo para definir acciones y estrategias a nivel de subzona hidrográfica en los instrumentos de planificación tanto nacionales como regionales. Por otro lado, permite identificar áreas temáticas de investigación, y orientar en relación con la ampliación de cobertura de monitoreo hidrometeorológico, ambiental y sectorial, también a nivel nacional y regional.

Sigue siendo pertinente hacer especial énfasis en la necesidad de estabilización, control de calidad,

completitud y robustez de la información histórica y estadística para mejorar la precisión de los resultados, así como la resolución espacial y temporal requerida para la toma de decisiones nacionales, regionales y locales.

Finalmente, es perentorio fortalecer las capacidades regionales para el monitoreo y la evaluación integrada del agua, lo cual es viable con el avance de las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA), que deben realizar de manera permanente las autoridades ambientales en todos los componentes del ciclo hidrológico. De esta forma se podrá contar con información suficiente, oportuna y confiable para la planificación y toma de decisiones sobre gestión integral del agua en los sistemas hídricos superficiales y subterráneos de sus áreas de jurisdicción. Por supuesto que estas evaluaciones deben soportarse en un monitoreo sistemático y permanente de las variables del ciclo hidrológico; que deben ser definidas en los componentes estratégicos, programáticos y tecnológicos de sus Programas Institucionales Regionales de Monitoreo (PIRMA); que deben ser coherentes con los lineamientos del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso, con el Programa Nacional de Aguas Subterráneas y con los demás programas de la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico y las apuestas del Plan Nacional de Desarrollo (PND) soportadas en el “Ordenamiento territorial alrededor del agua”.

Referencias bibliográficas

Aggarwal, P. K., Froehlich, K., Gonfiantini, R., y Gat, J. R. (2005). *Isotope Hydrology: A Historical Perspective from the IAEA. Isotopes in the Water Cycle*, 3–8. doi:10.1007/1-4020-3023-1_1

Aggarwal, P., Romatschke, U., Araguas-Araguas, L. et al. (2016). Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. *Nature Geosci* 9, 624–629. <https://doi.org/10.1038/ngeo2739>

Cañas, H., Pérez, O., Ruíz, D., Herrera, W., Watson, A. et al. (2019). *Modelo Hidrogeológico Conceptual Valle Medio del Magdalena Planchas 108 y 119 Puerto Wilches, Barrancabermeja, Sabana de Torres y San Vicente de Chucurí*. Bogotá D.C.: SGC.

Fu, B., Merritt, W. S., Croke, B. F. W., Weber, T. R. y Jakeman, A. J. (2019). A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects. *Environmental Modelling & Software*, 114, 75–97. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.008>

- Hinderer, M. (2012). From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales. *Sedimentary Geology*, 280, 21–59. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.009>
- Ideam. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Strategy Ltda. doi:978-958-8067-32
- Ideam. (2013, modificado 2022). *Zonificación y Codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Imprenta Nacional.
- Ideam. (2015). *Estudio Nacional del Agua ENA 2014*. Bogotá. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf
- Ideam. (2017). *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación*. Ideam. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/023774.html>
- Ideam. (2018). *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica*. Bogotá, D.C. ISBN: 978-958-5489-09-7
- Ideam. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: Ideam.
- MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Morán-Tejeda, E., Ceballos, J. L., Peña, K., Lorenzo-Lacruz, J., y López-Moreno, J. I. (2018). Recent evolution and associated hydrological dynamics of a vanishing tropical Andean glacier: Glaciar de Conejeras, Colombia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5445–5461, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5445-2018>.
- Rabatel, A., Ceballos, J. L., Micheletti, N., Jordan, E., González, J., C. et al. (2018). Toward an imminent extinction of Colombian glaciers? *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 100:1, 75–95, DOI: 10.1080/04353676.2017.1383015
- Rangel, R., Alejandro, R., Acuña, P., Naranjo, B., Agustín, J., Yamanaka, A. y Hugo, V. (2017). *Monitorización de sequías en México a través del índice estandarizado multivariado de sequía*. 9.
- Rivera Ospina, D. y Silva Álvarez, L. Á. (2015). *Colombia naturaleza en riesgo*. Cali, Colombia: I/M Editores. Obtenido de <https://www.imeditores.com/banocc/naturiesgo/>
- Romero Vargas, M. J. (2020). *Retos y desafíos en la implementación de técnicas de manejo de sedimentos en embalses de Colombia*. (Proyecto de Grado en Ingeniería Ambiental). Bogotá D.C.: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería civil y ambiental.
- Unesco. (2017). *Sistemas Acuíferos Transfronterizos en la Américas – Evaluación Preliminar. Vol. Serie ISARM Américas Nro. 1*. doi:ISBN 92-9089-101-7
- UNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*. Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf>
- UNGRD. (2021). *Consolidado reporte de emergencias 1998-2021*. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx>
- UNODC (2021). *Monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos 2020*. Bogotá: Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC).
- Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y. y Shao, Q. (2008). Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework – Model development and testing. *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.021>



IDEAM

Instituto de Hidrología,
Meteorología y
Estudios Ambientales