

INFORME DE AVANCE

MISIÓN CRECIMIENTO VERDE

PRESENTADO A:

Departamento Nacional de Planeación - DNP

PREPARADO POR:

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia – CTA
Línea de Agua y Medio Ambiente

MEDELLÍN

Diciembre de 2017

AUTORES

CENTRO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ANTIOQUIA – CTA. Línea de Agua y Medio Ambiente

Documento elaborado en marco del contrato número 043 de 2017, suscrito entre el Fondo Acción y el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia.

Equipo consultor

CÉSAR GARAY

I.Agrícola, M.Sc.
Director del proyecto

ANDREA CAROLINA GUZMÁN CABRERA

Economista., M.Sc
Especialista en políticas, instrumentos económicos
y financieros

JUAN CAMILO MÚNERA ESTRADA

I.Civil, M.Sc., Ph.D.(C)
Especialista en recursos hídricos

DIANA CATALINA RODRÍGUEZ LOAIZA

I. Sanitaria, M.Sc., Ph.D.
Especialista en tratamiento de aguas

Equipo de apoyo

SANTIAGO ECHAVARRÍA

I. de Producción, MBA
Director Centro de Ciencia Y Tecnología de
Antioquia

DIEGO ALEJANDRO CHALARCA RODRÍGUEZ

I. Sanitario, M.Sc. Eng. Ph.D.(C).
Componente agua potable, industrial y sistemas
de tratamiento de agua residual

CAROLINA MARÍA RODRÍGUEZ ORTÍZ

I. Forestal, M.Sc.
Componentes agrícola y pecuario

JUAN ESTEBAN GONZÁLEZ VALENCIA

I. Ambiental, M.Sc.
Componente minero

FERNANDO FLOREZ

Economista
Componente económico

LAURA MARCELA LOPERA VÁSQUEZ

I. Ambiental, Especialista en Gestión Ambiental
Profesional de apoyo técnico del proyecto

PARTICIPANTES

DNP

Alexandra Arévalo Espinosa
Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible
José Manuel Sandoval
Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible

Mariet Alejandra Sánchez
Subdirección de Desarrollo Ambiental
Sostenible

CONTENIDO

CONTENIDO	3
GLOSARIO.....	16
SIGLAS.....	18
1 INTRODUCCIÓN	20
2 MARCO CONCEPTUAL.....	23
2.1 PRODUCTIVIDAD DEL AGUA	28
2.2 MEDICIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD	32
3 PRODUCTIVIDAD SECTORIAL.....	40
3.1 PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL SECTOR AGRÍCOLA	40
3.2 PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL SECTOR MINERO	49
4 SECTOR AGRÍCOLA	53
4.1 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD	54
4.1.1 Sistemas de riego	56
4.1.2 Métodos de riego.....	63
4.1.3 Estimación de la eficiencia en el uso del agua.....	65
4.1.4 Factores que influyen en los problemas de eficiencia y productividad del agua	68
4.2 VERTIMIENTOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA	74
4.3 REÚSO.....	78
5 SECTOR PECUARIO	83
5.1 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD	85
5.1.1 Consumo vital de agua para los animales	87
5.1.2 Consumo de agua en servicios.....	90
5.1.3 Factores que influyen en los problemas de eficiencia y productividad del agua	93
5.2 VERTIMIENTOS EN EL SECTOR PECUARIO	95
5.3 REÚSO.....	98
6 SECTOR AGUA POTABLE	101
6.1 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD	101
6.1.1 Factores que influyen en los problemas de eficiencia y productividad del agua	112
6.2 REÚSO.....	114
7 SECTOR INDUSTRIAL MANUFACTURERO	117
7.1 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD	117
7.1.1 Factores que influyen en los problemas de eficiencia y productividad del agua	133
7.2 VERTIMIENTOS EN EL SECTOR INDUSTRIAL MANUFACTURERO	135
7.2.1 Sector alimentos	136
7.2.2 Sector elaboración y refinación de azúcar	137

7.2.3	Sector aceites y grasas de origen vegetal y animal	137
7.2.4	Sector papel.....	138
7.2.5	Producción de malta, elaboración de cervezas y otras bebidas malteadas	138
7.2.6	Beneficio de café.....	138
7.2.7	Sector textil.....	139
7.2.8	Sector curtiembres.....	139
7.2.9	Sector galvanoplastia	140
7.3	REÚSO.....	142
8	SECTOR MINERO	145
8.1	EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD	145
8.2	VERTIMIENTOS EN EL SECTOR MINERO	146
8.3	REÚSO.....	150
9	ANÁLISIS TERRITORIAL.....	153
9.1	DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN COLOMBIA	153
9.2	PRIORIZACIÓN DE SUBZONAS HIDROGRÁFICAS PARA EL REÚSO Y RECIRCULACIÓN DEL AGUA 157	
9.3	PRIORIZACIÓN DE SUBZONAS HIDROGRÁFICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES.....	160
9.4	INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS SECTORES ECONÓMICOS.....	161
9.4.1	Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100. Nivel Nacional-regional. Herramienta para la toma de decisiones	161
9.4.2	Escenarios de cambio climático elaborados por el IDEAM para Colombia	161
9.4.3	Efectos esperados del cambio climático sobre las subzonas hidrográficas del país en las que se ha establecido algún tipo de presión en relación con el recurso hídrico	166
10	FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA Y COBERTURA DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	173
10.1	ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	173
10.2	PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA COBERTURA DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	183
10.2.1	Priorización del gobierno para los sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	183
10.2.2	Financiación de los sistemas de tratamiento de agua residual.....	183
10.2.3	Políticas de protección de cuencas y campañas de uso racional del agua.....	184
10.3	PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	184
10.3.1	Desconocimiento en el arranque de las plantas de tratamiento	184

10.3.2	Personal no capacitado para operar los sistemas de tratamiento.....	185
10.3.3	Inadecuada selección de los sistemas de tratamiento para el tipo de agua a tratar	185
10.3.4	Sistemas de tratamiento obsoletos	186
10.3.5	Normatividad y falta de sanciones más estrictas	187
10.3.6	Falta de prioridad en el tema de tratamientos de aguas residuales.....	187
11	ESTIMACIÓN DE COSTOS MARGINALES DE CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA	189
11.1	Metodología.....	190
11.2	Resultados	191
11.3	Observaciones finales sobre los costos marginales de construcción de las PTAR en Colombia.....	196
12	EFFECTO DE LAS VARIACIONES DE LA TASA RETRIBUTIVA POR VERTIMIENTOS SOBRE LAS CARGAS CONTAMINANTES EN COLOMBIA 2010-2015.....	198
12.1	Metodología.....	198
12.2	Análisis de datos	199
12.3	Análisis de información faltante	201
12.4	Análisis de resultados.....	203
12.4.1	Comportamiento nacional 2010-2015.....	203
12.4.2	Modelo Econométrico	208
12.4.3	Análisis a partir de los resultados del modelo	211
13	EFFECTO DE LAS VARIACIONES DE LA TUA EN LA CANTIDAD DE AGUA UTILIZADA EN LOS SECTORES DE AGRICULTURA, AGUA POTABLE E INDUSTRIA.	215
13.1	Metodología.....	215
13.2	Análisis de datos	216
13.3	Análisis de información faltante	218
13.4	Análisis de resultados.....	220
13.4.1	Comportamiento nacional 2010-2015.....	220
13.4.2	Modelo Econométrico	224
13.4.3	Análisis a partir de los resultados del modelo	226
14	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	231
15	BIBLIOGRAFÍA.....	234

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. REÚSO DE AGUA EN ALGUNOS PAÍSES DEL MUNDO.....	25
TABLA 2. PRODUCTIVIDAD HÍDRICA 2007-2014	37
TABLA 3. PRODUCTIVIDAD HÍDRICA 2010-2015P	39
TABLA 4. PRECIOS EN PESOS POR TON AL 2012	40
TABLA 5. RESULTADOS DE LAS PROYECCIONES GREMIALES DE ÁREAS SEMBRADAS PARA LOS CULTIVOS ANALIZADOS.....	43
TABLA 6. TASA DE CRECIMIENTO PROMEDIO POR CULTIVO 2007-2016 Y % DE CUMPLIMIENTO DE LAS METAS GREMIALES.....	44
TABLA 7. TASA DE CRECIMIENTO DEL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS ENTRE LOS AÑOS 2007-2016.....	45
TABLA 8. TASA DE CRECIMIENTO PROMEDIO DE LA PRODUCCIÓN, ÁREAS SEMBRADAS Y RENDIMIENTO POR CULTIVO Y DEPARTAMENTO EN EL PERIODO 2006 - 2016.....	46
TABLA 9. ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA	50
TABLA 10. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DEL AGUA.....	50
TABLA 11. PRODUCTIVIDAD ECONÓMICA DEL ORO.....	52
TABLA 12. PRODUCTIVIDAD ECONÓMICA DEL CARBÓN.....	52
TABLA 13. ALGUNOS DATOS ASOCIADOS A LOS CULTIVOS PRIORIZADOS EN COLOMBIA.....	53
TABLA 14. PRINCIPALES OBRAS DE UN SISTEMA DE RIEGO	56
TABLA 15. DISTRITOS DE ADECUACIÓN DE TIERRAS DE GRAN ESCALA EN COLOMBIA.....	62
TABLA 16. EFICIENCIAS EN LOS SISTEMAS DE RIEGO REPORTADOS EN LATINOAMÉRICA Y LOS EMPLEADOS EN COLOMBIA.....	63
TABLA 17. REQUERIMIENTO DE AGUA DE RIEGO PARA LOS CULTIVOS PRIORIZADOS EN COLOMBIA	67
TABLA 18. FACTORES IDENTIFICADOS PARA EL SECTOR AGRÍCOLA.....	69
TABLA 19. ESTIMACIONES DE CANTIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE CONSUMO DE NUTRIENTES POR GRUPOS DE CULTIVOS A NIVEL MUNDIAL	77
TABLA 20. PRINCIPALES CULTIVOS EMPLEADOS PARA REÚSO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LATINOAMÉRICA	80
TABLA 21. INVENTARIO PECUARIO NACIONAL	84
TABLA 22. CARACTERÍSTICAS DE LAS ACTIVIDADES PRIORIZADAS EN EL SECTOR PECUARIO.....	84
TABLA 23. CLASIFICACIÓN CIU DE LOS ESTABLECIMIENTOS INDUSTRIALES MANUFACTUREROS QUE REPORTAN UN USO DE AGUA PECUARIO EN EL RUA 2016.....	87
TABLA 24. REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA EL GANADO EN RELACIÓN A LA TEMPERATURA AMBIENTE.....	88
TABLA 25. CONSUMO DE AGUA VITAL POR SUBSECTORES	89

TABLA 26. MÓDULOS DE CONSUMO DE AGUA EN SERVICIOS SEGÚN DIFERENTES FUENTES DE INFORMACIÓN	91
TABLA 27. ESTIMACIONES DE LOS CONTENIDOS DE NUTRIENTES DE LA GALLINAZA PROCEDENTES DE LAS CAMAS DE GALLINAS Y POLLOS (KILOGRAMO/TONELADA DE HECES EXCRETADA).....	96
TABLA 28. PRODUCCIÓN DIARIA DE NUTRIENTES SEGÚN ESTADO FISIOLÓGICO PORCINO.....	97
TABLA 29. INGESTA Y EXCRECIONES DE NUTRIENTES POR ESPECIE ANIMAL EN SITUACIONES DE ALTA PRODUCTIVIDAD	97
TABLA 30. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL USO DE AGUA PARA EL SECTOR AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO EN LAS ÁREAS HIDROGRÁFICAS	102
TABLA 31. PORCENTAJE DE ACCESO A AGUA POTABLE EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE	102
TABLA 32. CONSUMO BÁSICO DE AGUA POTABLE EN AMÉRICA LATINA.	104
TABLA 33. TERMINOLOGÍA DE BALANCE HÍDRICO PROPUESTA POR IWA	106
TABLA 34. PROMEDIO DE ÍNDICE DE PÉRDIDAS DE AGUA POR USUARIO FACTURADO – IPUF ENTRE 2007 Y 2011.....	110
TABLA 35. FACTORES IDENTIFICADOS PARA EL SECTOR AGUA POTABLE	112
TABLA 36. GRUPOS INDUSTRIALES QUE CONCENTRAN EL MAYOR NÚMERO DE ESTABLECIMIENTOS EN COLOMBIA (>50,1%) SEGÚN CIIU REV. 4 A.C. 2015.....	119
TABLA 37. DISTRIBUCIÓN DEL USO DE AGUA PARA EL SECTOR INDUSTRIAL POR ÁREA HIDROGRÁFICA. EN PARÉNTESIS SE INDICA EL PORCENTAJE DEMANDADO RESPECTO A LA DEMANDA TOTAL DEL SECTOR	119
TABLA 38. DEMANDA DE AGUA Y TIPOS DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO USADAS POR LOS ESTABLECIMIENTOS INDUSTRIALES MANUFACTUREROS 2013 A 2015.....	120
TABLA 39. VOLUMEN DE AGUA TOTAL CAPTADA EN EL SECTOR, SEGÚN AGREGACIÓN DE DIVISIONES INDUSTRIALES	122
TABLA 40. VOLUMEN TOTAL DE AGUA VERTIDA POR EL SECTOR, SEGÚN AGREGACIÓN DE DIVISIONES INDUSTRIALES.	122
TABLA 41. CLASES INDUSTRIALES QUE FUERON IDENTIFICADAS POR REALIZAR UNA CAPTACIÓN SUPERIOR AL PROMEDIO TOTAL DEL SECTOR (157.327 M ³ /AÑO).	123
TABLA 42. PRINCIPALES CLASES INDUSTRIALES EN COLOMBIA QUE GENERAN MAYORES VERTIMIENTOS CONTAMINANTES POR DBO ₅ , DQO Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).	124
TABLA 43. PRINCIPALES CLASES INDUSTRIALES EN COLOMBIA QUE GENERAN MAYORES VERTIMIENTOS CONTAMINANTES POR METALES PESADOS (CADMIO, ZINC, COBRE, CROMO Y TOTAL, PLOMO Y MERCURIO)	125
TABLA 44. PRINCIPALES CLASES INDUSTRIALES EN COLOMBIA QUE GENERAN MAYORES VERTIMIENTOS CONTAMINANTES POR LOS NUTRIENTES: NITRÓGENO TOTAL Y FÓSFORO TOTAL.....	125

TABLA 45. CLASES INDUSTRIALES PRIORIZADAS EN EL SECTOR POR SU MAYOR PRESIÓN SOBRE EL RECURSO HÍDRICO	126
TABLA 46. MÓDULOS DE CONSUMO PARA DIFERENTES CLASES INDUSTRIALES EN COLOMBIA	127
TABLA 47. REFERENTES DE EFICIENCIA DEL AGUA EN DIFERENTES PAÍSES.....	128
TABLA 48. FACTORES IDENTIFICADOS DEL SECTOR DE LA INDUSTRIA MANUFACTURERA Y QUE INFLUYEN EN LOS PROBLEMAS DE PRODUCTIVIDAD Y EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA.....	133
TABLA 49. CARACTERÍSTICAS PROMEDIO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL LAVADO DE CAFÉ	138
TABLA 50. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE LOS VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES DEL SECTOR INDUSTRIAL.....	141
TABLA 51. PRODUCCIÓN Y CRECIMIENTO DE ORO Y CARBÓN EN COLOMBIA	145
TABLA 52. PRINCIPALES FACTORES QUE INCIDEN EN LA EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL SECTOR MINERO (ORO Y CARBÓN).....	146
TABLA 53. ETAPAS Y OPERACIONES QUE GENERAN VERTIMIENTOS EN LA MINERÍA DE ORO Y CARBÓN.....	147
TABLA 54. SUBZONAS HIDROGRÁFICAS POR IUA “MUY ALTO” O “CRÍTICO” SEGÚN ENA 2014	159
TABLA 55. SUBZONAS HIDROGRÁFICAS PRIORIZADAS PARA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR EL PROGRAMA SAVER O POR SU NIVEL DE CRITICIDAD DE ACUERDO AL ÍNDICE IACAL	160
TABLA 56. CAMINOS DE FORZAMIENTO RADIATIVO (FR) SELECCIONADOS POR EL IPCC PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE EMISIONES GEI EN EL PLANETA A 2100	162
TABLA 57. RESULTADOS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA REGIÓN DE LA AMAZONIA EN LOS TRES PERÍODOS DE PROYECCIÓN DE 30 AÑOS (2011 - 2040; 2041 - 2070 Y 2071 - 2100).....	162
TABLA 58. RESULTADOS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA REGIÓN DE LA ANDINA EN LOS TRES PERÍODOS DE PROYECCIÓN DE 30 AÑOS (2011 - 2040; 2041 - 2070 Y 2071 - 2100)	163
TABLA 59. RESULTADOS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA REGIÓN CARIBE EN LOS TRES PERÍODOS DE PROYECCIÓN DE 30 AÑOS (2011 - 2040; 2041 - 2070 Y 2071 - 2100)	163
TABLA 60. RESULTADOS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA REGIÓN DE LA ORINOQUIA EN LOS TRES PERÍODOS DE PROYECCIÓN DE 30 AÑOS (2011 - 2040; 2041 - 2070 Y 2071 - 2100).....	164
TABLA 61. RESULTADOS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA REGIÓN DE LA PACÍFICO EN LOS TRES PERÍODOS DE PROYECCIÓN DE 30 AÑOS (2011 - 2040; 2041 - 2070 Y 2071 - 2100).....	164
TABLA 62. EFECTOS ESPERADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA CADA UNA DE LAS SZH QUE PRESENTAN ALGÚN TIPO DE PRESIÓN EN RELACIÓN CON EL RECURSO HÍDRICO DE ACUERDO CON LOS INDICADORES EMPLEADOS. LA ÚLTIMA COLUMNA HACE REFERENCIA AL NIVEL DE RIESGO ASOCIADO AL RECURSO HÍDRICO, DE ACUERDO A LA TERCERA COMUNICACIÓN NACIONAL (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017A)	167
TABLA 63. PRINCIPALES SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE ARD Y ARND	174

TABLA 64. TIPO DE TRATAMIENTO, NÚMERO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AR URBANA Y CAUDAL MEDIO TRATADO EN COLOMBIA (AÑO BASE 2013).	176
TABLA 65. CAUDAL VERTIDO, CAUDAL TRATADO Y PORCENTAJE DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL URBANA EN COLOMBIA PARA EL AÑO 2014.	178
TABLA 66. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES POR TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.	182
TABLA 67. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LA MUESTRA DE PTAR	192
TABLA 68. ESTIMACIÓN FUNCIÓN DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN PTAR POR HABITANTE	193
TABLA 69. AÑOS SIN REPORTAR CAR 2010-2015	202
TABLA 70. TOTAL CAR. DATOS FALTANTES POR VARIABLE 2010-2015	202
TABLA 71. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	208
TABLA 72. COLOMBIA. TARIFA MÍNIMA TR 2010-2015.....	209
TABLA 73. MODELOS ESTIMADOS PARA TR DBO POR TIPO DE ESTIMACIÓN.....	210
TABLA 74. PRUEBAS PARA SELECCIÓN DE MODELOS TR DBO	210
TABLA 75. MODELOS ESTIMADOS PARA TR SST POR TIPO DE ESTIMACIÓN.....	210
TABLA 76. PRUEBAS PARA SELECCIÓN DE MODELOS TR SST.....	211
TABLA 77. TOTAL CAR. DATOS FALTANTES POR AÑO 2010-2015.....	218
TABLA 78. TOTAL CAR. DATOS FALTANTES POR VARIABLES 2010-2015	219
TABLA 79. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	224
TABLA 80. MODELOS ESTIMADOS POR TIPO DE ESTIMACIÓN	225
TABLA 81. PRUEBAS PARA SELECCIÓN DE MODELOS TUA.....	225
TABLA 82. TIPOS DE USO POR CAR CON LOS INTERCEPTOS MÁS ALTOS	226
TABLA 83. TIPOS DE USO POR CAR CON LOS INTERCEPTOS MÁS BAJOS	226
TABLA 84. TARIFA MÍNIMA TUA PROPUESTA 2014.....	228
TABLA 85. COLOMBIA. TARIFA MÍNIMA TUA 2010-2015.....	229
TABLA 86. PROPUESTA DE AUMENTO DE LA TM.....	229

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DEMANDA HÍDRICA SECTORIAL	24
FIGURA 2. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA A NIVEL MUNDIAL, TOTAL (PIB EN USD\$ CONSTANTES DEL AÑO 2014 POR METRO CÚBICO DE EXTRACCIÓN TOTAL DE AGUA)	34
FIGURA 3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN LATINOAMÉRICA, TOTAL (PIB EN US\$ CONSTANTES DEL AÑO 2014 POR METRO CÚBICO DE EXTRACCIÓN TOTAL DE AGUA)	34
FIGURA 4. PRODUCTIVIDAD ECONÓMICA DEL AGUA ESTIMADA PARA COLOMBIA DESDE 2007-2014. FUENTE: (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, 2016)	36
FIGURA 5. PRODUCTIVIDAD HÍDRICA PARA EL PERIODO 2010 - 2015P	38
FIGURA 6. PRODUCTIVIDAD ECONÓMICA DEL AGUA PROMEDIO POR CULTIVO 2012.....	41
FIGURA 7. PRODUCTIVIDAD FÍSICA DEL AGUA PROMEDIO POR CULTIVO 2012	41
FIGURA 8. PRODUCTIVIDAD ECONÓMICA DEL AGUA PROMEDIO POR DEPARTAMENTO 2012	42
FIGURA 9. PRODUCTIVIDAD FÍSICA DEL AGUA PROMEDIO POR DEPARTAMENTO 2012.....	42
FIGURA 10. TASA DE CRECIMIENTO PROMEDIO DE LOS PRECIOS DE LOS PRODUCTOS AGRÍCOLAS.....	49
FIGURA 11. PARTICIPACIÓN DE LOS GRANDES GRUPOS DE CULTIVOS EN EL ÁREA TOTAL SEMBRADA EN COLOMBIA.....	53
FIGURA 12. ESQUEMA DE USO DEL AGUA EN EL SECTOR AGRÍCOLA	55
FIGURA 13. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE RIEGO Y SUS EFICIENCIAS ASOCIADAS	57
FIGURA 14. DISTRITOS DE ADECUACIÓN DE TIERRAS POR DEPARTAMENTO EN COLOMBIA.....	58
FIGURA 15. ÁREA NETA EN LOS DISTRITOS DE ADECUACIÓN DE TIERRAS POR DEPARTAMENTO EN COLOMBIA	59
FIGURA 16. DISTRITOS DE ADECUACIÓN DE TIERRAS CON CONCESIÓN Y SIN CONCESIÓN DE AGUAS POR DEPARTAMENTO EN COLOMBIA.....	59
FIGURA 17. DISTRIBUCIÓN DE LOS DISTRITOS DE ADECUACIÓN DE TIERRAS SEGÚN SU ESCALA EN COLOMBIA	61
FIGURA 18. EFICIENCIA PROMEDIO POR MUNICIPIO SEGÚN LOS DISTRITOS DE RIEGO REPORTADOS EN EL SIGOT	66
FIGURA 19. EFICIENCIA PROMEDIO POR DEPARTAMENTO SEGÚN LOS DISTRITOS DE RIEGO REPORTADOS EN EL SIGOT	67
FIGURA 20. REQUERIMIENTO DE AGUA DE RIEGO Y DEMANDA HÍDRICA PARA LOS CULTIVOS PRIORIZADOS EN COLOMBIA	68
FIGURA 21. CONSUMO DE FERTILIZANTES	74
FIGURA 22. CONSUMO DE FERTILIZANTES EN SURAMÉRICA AÑOS 2012 A 2014.....	75
FIGURA 23. CONSUMO DE FERTILIZANTES EN COLOMBIA	76

FIGURA 24. DEMANDA DE AGROQUÍMICOS POR PARTE DEL SECTOR AGRÍCOLA EN COLOMBIA PARA EL AÑO 2012	78
FIGURA 25. SISTEMAS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN EL MUNDO.....	79
FIGURA 26. ESQUEMA GENERAL DE USO DEL AGUA EN EL SECTOR PECUARIO.....	86
FIGURA 27. CONSUMO DE AGUA VITAL POR DEPARTAMENTOS PARA EL INVENTARIO PECUARIO AL 2016	90
FIGURA 28. DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA VITAL POR EL INVENTARIO PECUARIO AL 2016	90
FIGURA 29. APROXIMACIÓN AL CONSUMO DE AGUA EN SERVICIOS POR DEPARTAMENTO PARA EL SECTOR PECUARIO, SEGÚN INVENTARIO AL 2016.....	93
FIGURA 30. COBERTURA TOTAL URBANA Y RURAL DE ACUEDUCTO EN LOS MUNICIPIOS DE COLOMBIA EN 2016.....	102
FIGURA 31. CONSUMO PROMEDIO ANUAL POR USUARIO DE LOS ESTRATOS 1 A 6 EN MUNICIPIOS UBICADOS EN CLIMAS CÁLIDO, TEMPLADO Y FRÍO ENTRE LOS AÑOS 2005 A 2014	104
FIGURA 32. RELACIÓN ENTRE PÉRDIDAS DE AGUA Y SOSTENIBILIDAD.....	105
FIGURA 33. ESQUEMA DE USO DEL AGUA EN EL SECTOR AGUA POTABLE.....	107
FIGURA 34. PORCENTAJE DE PÉRDIDAS TÉCNICAS EN EL SISTEMA DE ACUEDUCTO.	108
FIGURA 35. ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA – IANC (%) POR MUNICIPIO, PARA LOS AÑOS 2013 Y 2014.....	109
FIGURA 36. PROMEDIO ANUAL DE ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA EN COLOMBIA. PERÍODO 2010 – 2016.....	109
FIGURA 37. IPUF PARA EMPRESAS PRESTADORAS EN 33 MUNICIPIOS CON NIVELES DE MICROMEDICIÓN SUPERIOR AL 80% EN EL AÑO 2011.....	111
FIGURA 38. EJEMPLO DE LA CLASIFICACIÓN INDUSTRIAL INTERNACIONAL UNIFORME ADAPTADA PARA COLOMBIA – CIIU REV. 4 AC.....	117
FIGURA 39. ESQUEMA DE USO DEL AGUA EN EL SECTOR INDUSTRIAL.....	118
FIGURA 40. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS ESTABLECIMIENTOS INDUSTRIALES POR ÁREAS METROPOLITANAS. TOTAL NACIONAL PARA EL AÑO 2015.....	118
FIGURA 41. SUSCRIPTORES POR USO Y ESTRATO PARA EL SERVICIO DE ACUEDUCTO	121
FIGURA 42. VOLUMEN TOTAL DE AGUA CAPTADA Y VERTIDA (MILLONES DE METROS CÚBICOS) POR EL SECTOR, SEGÚN GRUPOS DE DIVISIONES INDUSTRIALES ENTRE EL 2013 Y 2015.	123
FIGURA 43. GENERACIÓN DE AGUA RESIDUALES EN LA INDUSTRIA AZUCARERA.....	137
FIGURA 44. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN Y DE LA OFERTA HÍDRICA EN COLOMBIA	154
FIGURA 45. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN DIFERENTES ZONAS DE COLOMBIA.....	154
FIGURA 46. SISTEMA DE INDICADORES HÍDRICOS PARA ENA 2014	155
FIGURA 47. CLASIFICACIÓN DE LAS SZH DE ACUERDO A LOS INDICADORES IUA E IACAL.....	157
FIGURA 48. PORCENTAJE DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL DESDE EL AÑO 2010 A 2014 EN COLOMBIA.....	176

FIGURA 49. TIPO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE MAYOR USO EN COLOMBIA. (A) SISTEMAS DE TRATAMIENTO URBANOS (SSPD, 2014C) Y (B) SISTEMAS DE TRATAMIENTO REPORTADOS EN EL RUA 2016 PARA LAS 2830 INDUSTRIAS MANUFACTURERAS (IDEAM, 2017).....177

FIGURA 50. PROCESOS APLICADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN PAÍSES SELECCIONADOS. DISTRIBUCIÓN POR TECNOLOGÍAS180

FIGURA 51. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL URBANA MÁS COMUNES EN COLOMBIA.....181

FIGURA 52. IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS ANAEROBIAS PARA AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL ENTRE LOS PERIODOS 1981 A 2007 (IZQUIERDA) Y 2002 A 2007 (DERECHA).187

FIGURA 53. FUNCIÓN DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN PARA TIPO DE TRATAMIENTO PRELIMINAR.....194

FIGURA 54. FUNCIÓN DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN PARA TIPO DE TRATAMIENTO PRIMARIO Y SECUNDARIO194

FIGURA 55. COSTO MARGINAL DE CONSTRUCCIÓN TIPO DE TRATAMIENTO PRELIMINAR195

FIGURA 56. COSTO MARGINAL DE CONSTRUCCIÓN TIPO DE TRATAMIENTO PRIMARIO Y SECUNDARIO196

FIGURA 57. COLOMBIA. FACTOR REGIONAL PROMEDIO ANUAL DBO VS SST 2010-2015203

FIGURA 58. COLOMBIA. CARGA PROMEDIO ANUAL DBO VS SST 2010-2015204

FIGURA 59. COLOMBIA. FACTURACIÓN PROMEDIO ANUAL DBO VS SST 2010-2015205

FIGURA 60. COLOMBIA. FACTURACIÓN PROMEDIO ANUAL VS RECAUDO PROMEDIO ANUAL 2010-2015205

FIGURA 61. COLOMBIA. CARGA PROMEDIO VS TR PROMEDIO 2010-2015.....206

FIGURA 62. COLOMBIA. CARGA ACTUAL PROMEDIO SST VS TR 2010-2015.....207

FIGURA 63. COLOMBIA. ACTIVIDADES ECONÓMICAS CON MAYOR PROMEDIO CARGA DBO5 2015207

FIGURA 64. COLOMBIA. ACTIVIDADES ECONÓMICAS CON MAYOR PROMEDIO CARGA SST 2015208

FIGURA 65. COLOMBIA. NÚMERO DE CONCESIONES PROMEDIO VS VOLUMEN CAPTADO PROMEDIO 2010-2015.....220

FIGURA 66. COLOMBIA. PROMEDIO VOLUMEN CONCESIONADO VS PROMEDIO VOLUMEN CAPTADO 2010-2015.....220

FIGURA 67. COLOMBIA. VALOR A PAGAR PROMEDIO POR CAPTACIÓN VS RECAUDO PROMEDIO 2010-2015221

FIGURA 68. COLOMBIA. VOLUMEN CAPTADO PROMEDIO VS VALOR PROMEDIO TUA 2010-2015.....222

FIGURA 69. COLOMBIA. CAPTACIÓN DE AGUA PROMEDIO. UN USO 2014-2015223

FIGURA 70. COLOMBIA. CAPTACIÓN DE AGUA PROMEDIO. DOS USOS O MÁS USOS 2014-2015223

LISTA DE CUADROS

CUADRO 1 CASO DE ÉXITO. RECIRCULACIÓN DE AGUA EN CULTIVOS DE FLORES	55
CUADRO 2 CASO DE ÉXITO. AUMENTO EN LA EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN MÉXICO	64
CUADRO 3. CASO DE ÉXITO. AUMENTO EN LA EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN COLOMBIA.	65
CUADRO 4. CASO DE ÉXITO. AUMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD EN MÉXICO.	69
CUADRO 5. CASO DE ÉXITO. INNOVACIÓN Y PRODUCTIVIDAD EN ESTADOS UNIDOS.	73
CUADRO 6. CASOS DE ÉXITO. REÚSO DE AGUA EN LA AGRICULTURA.	80
CUADRO 7. CASO DE ÉXITO. AUMENTO DE LA EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL SUBSECTOR PORCÍCOLA.....	91
CUADRO 8. CASO DE ÉXITO. AUMENTO DE LA EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL SUBSECTOR AVÍCOLA.....	95
CUADRO 9. CASO DE ÉXITO. EFICIENCIA, REÚSO Y TRATAMIENTO DE AR EN PUERTO RICO.....	99
CUADRO 10. CASO DE ÉXITO. ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA	112
CUADRO 11. CASOS DE ÉXITO. REÚSO DE AGUA PARA USO POTABLE.....	115
CUADRO 12. PREMIO DE CONSERVACIÓN Y REÚSO DEL AGUA (BRASIL).....	129
CUADRO 13. CASO EXITOSO INDUSTRIA DE BEBIDAS.....	129
CUADRO 14. CASOS EXITOSOS INDUSTRIA DE ALIMENTOS.	130
CUADRO 15. REÚSO DE AGUA EN SINGAPUR	142
CUADRO 16. CASO DE REÚSO EN EL SECTOR DE LA INDUSTRIA BRASILEIRA.....	143
CUADRO 17. CASO DE ÉXITO. INFORME DE SUSTENTABILIDAD DE LA EMPRESA TECK.	150
CUADRO 18. CASO DE ÉXITO. VIABILIDAD ECONÓMICA PARA TRATAR Y RECIRCULAR AGUAS RESIDUALES.	151
CUADRO 19. CASO DE ÉXITO. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA REÚSO EN ABASTECIMIENTO DOMÉSTICO.....	151
CUADRO 20. CASO DE ÉXITO. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA REÚSO EN EMPRESA MINERA.	151
CUADRO 21. CASO DE ÉXITO. GESTIÓN EFICIENTE EN EL USO DEL AGUA DE LA EMPRESA CODELCO.	152
CUADRO 22. CVC FACTOR REGIONAL PROMEDIO CONSTANTE E IGUAL A 1.....	204
CUADRO 23. DOS CASOS SOBRE EFICIENCIA EN EL RECAUDO DE TR.....	206
CUADRO 24. CASO DE VOLUMEN CONCESIONADO Y VOLUMEN CAPTADO IGUALES	221
CUADRO 25. CASO DE NO DIFERENCIACIÓN DE LAS CONCESIONES POR TIPO DE USO.....	224

LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA DULCE.....	33
ECUACIÓN 2. PRODUCTIVIDAD HÍDRICA.....	33
ECUACIÓN 3. INTENSIDAD EN EL USO DEL AGUA.....	50
ECUACIÓN 4. EFICIENCIA EN EL CONSUMO DE AGUA.....	50
ECUACIÓN 5. PRODUCTIVIDAD FÍSICA ASOCIADA AL AGUA USADA.....	50
ECUACIÓN 6. PRODUCTIVIDAD FÍSICA ASOCIADA AL AGUA CONSUMIDA.....	50
ECUACIÓN 7. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA EN EL SECTOR AGRÍCOLA.....	55
ECUACIÓN 8. EFICIENCIA DEL RIEGO.....	56
ECUACIÓN 9. EFICIENCIA SECTOR PECUARIO.....	86
ECUACIÓN 10. CONSUMO DE AGUA LIBRE.....	88
ECUACIÓN 11. CÁLCULO IANC.....	108
ECUACIÓN 12. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE POR USO DEL AGUA (IUA) (IDEAM, 2015B).....	156
ECUACIÓN 13. FUNCIÓN DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN A ESTIMAR.....	190
ECUACIÓN 14. FUNCIÓN DE COSTOS DE CONSTRUCCIÓN POR TIPO DE TRATAMIENTO A ESTIMAR.....	190
ECUACIÓN 15. FORMA <i>COBB DOUGLAS</i> DE LA FUNCIÓN DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN A ESTIMAR.....	190
ECUACIÓN 16. FUNCIÓN DE COSTO MARGINAL DE CONSTRUCCIÓN A ESTIMAR.....	191
ECUACIÓN 17. FUNCIÓN DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN POR HABITANTE ESTIMADA.....	193
ECUACIÓN 18. FUNCIÓN DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN POR HABITANTE PARA TIPO DE TRATAMIENTO PRELIMINAR ESTIMADA.....	193
ECUACIÓN 19. FUNCIÓN DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN POR HABITANTE PARA TIPO DE TRATAMIENTO PRIMARIO Y SECUNDARIO ESTIMADA.....	194
ECUACIÓN 20. FUNCIÓN DE COSTO MARGINAL DE CONSTRUCCIÓN PARA TIPO DE TRATAMIENTO PRELIMINAR ESTIMADA.....	195
ECUACIÓN 21. FUNCIÓN DE COSTO MARGINAL DE CONSTRUCCIÓN PARA TIPO DE TRATAMIENTO Y SECUNDARIO ESTIMADA.....	195
ECUACIÓN 22. TASA RETRIBUTIVA.....	200
ECUACIÓN 23. MODELO 1.....	200
ECUACIÓN 24. MODELO 2.....	200
ECUACIÓN 25. MODELO 3.....	200
ECUACIÓN 26. MODELO 4.....	200
ECUACIÓN 27. PRUEBAS DE HIPÓTESIS PARA SELECCIÓN DE MODELOS DE DATOS PANEL.....	201
ECUACIÓN 28. TASA DE FACTURACIÓN.....	217

ECUACIÓN 29. MODELO POR ESTIMAR SIN ACTIVIDAD ECONÓMICA.....	217
ECUACIÓN 30. MODELO POR ESTIMAR CON ACTIVIDAD ECONÓMICA	217
ECUACIÓN 31. PRUEBAS DE HIPÓTESIS PARA SELECCIÓN DE MODELOS DE DATOS PANEL.....	218

GLOSARIO

- **Agua azul:** flujo horizontal de agua. Agua de escorrentía, agua de fuentes superficiales, ríos y lagos o fuentes de agua subterráneas, acuíferos (IDEAM, 2015a)
- **Aguas residuales tratadas:** son aquellas aguas residuales, que han sido sometidas a operaciones o procesos unitarios de tratamiento que permiten cumplir con los criterios de calidad requeridos para su reúso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).
- **Agua verde:** flujo vertical de agua. Agua que proviene de la precipitación y que queda almacenada en el suelo como humedad (IDEAM, 2015a)
- **Agua virtual:** Agua contenida en un bien o producto, incluyendo la necesaria para su producción (Hoekstra, 2003).
- **Caudal o flujo de Retorno:** es el volumen de agua que se reincorpora o es devuelto a la red de drenaje de la cuenca como remanente de los volúmenes usados o aprovechados en los procesos productivos de las actividades económicas y en el consumo humano. El agua que no fue utilizada en el proceso productivo se retorna a las fuentes hídricas, incluyendo las pérdidas (IDEAM, 2015a).
- **Demanda hídrica:** “La sustracción de agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades y los requerimientos de consumo humano, producción sectorial y demandas esenciales de los ecosistemas existentes sean intervenidos o no. La extracción y, por ende, la utilización del recurso implica sustracción, alteración, desviación o retención temporal del recurso hídrico, incluidos en éste los sistemas de almacenamiento que limitan el aprovechamiento para usos compartidos u otros usos excluyentes” (IDEAM, 2010a)
- **Distritos de Adecuación de Tierras:** La delimitación del área de influencia de obras de infraestructura destinadas a dotar un área determinada con riego, drenaje o protección contra inundaciones; para los fines de gestión y manejo, se organizará en unidades de explotación agropecuaria (Ley 41 de 1993)
- **Huella hídrica:** Volumen usado de agua para un proceso antrópico que no retorna a la cuenca de donde fue extraída o retorna con una calidad diferente a la original” (IDEAM, 2015a)
- **Huella hídrica azul:** “La apropiación humana de agua de los sistemas hídricos superficiales, subsuperficiales y subterráneos para un uso antrópico que no retorna a la cuenca origen” (IDEAM, 2015a)
- **Índice de Agua No Contabilizada (IANC):** indicador porcentual que compara el volumen de agua facturado a los usuarios del servicio de acueducto, respecto al volumen de agua que se produce en las plantas de tratamiento de agua potable; lo cual da un estimado de las pérdidas que se tienen en la red de distribución, entre otras, por fugas en red, conexiones fraudulentas o mediciones de consumo imprecisas (SSPD, 2015)
- **Índice de Pérdidas de Agua por Usuario Facturado (IPUF):** índice operacional expresado en metros cúbicos por suscriptor por mes y representa el volumen de agua perdida por suscriptor por mes sin discriminar si las pérdidas son técnicas o comerciales (CRA, 2013)
- **Índice de Uso del Agua (IUA):** este indicador relaciona la demanda o extracción de agua por parte de los sectores económicos y la oferta hídrica disponible (se descuenta el caudal ambiental), para una unidad territorial, que para este caso corresponde a subzona hidrográfica (IDEAM, 2015a).
- **Índice Agua no Retornada a la Cuenca (IARC):** este indicador es un complemento del IUA, y relaciona el consumo de agua generado por los sectores económicos y la oferta hídrica disponible (se descuenta el caudal ambiental) por subzona hidrográfica (IDEAM, 2015a).

- **Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL):** es la razón existente entre la carga de contaminante que se estima recibe una subzona hidrográfica en un período de tiempo y la oferta hídrica superficial, de esta misma subzona hidrográfica (IDEAM, 2010b).
- **Índice de Presión Hídrica al Ecosistema (IPHE):** mide la relación entre la huella hídrica verde y el agua verde disponible en una unidad espacial definida y en un periodo de tiempo determinado (IDEAM, 2015a; Zeng, Liu, Koeneman, Zarate, & Hoekstra, 2012).
- **Pérdidas:** las pérdidas de un sistema de acueducto que hacen parte de los flujos de retorno se definen como los volúmenes de agua estimados de fugas y filtraciones causadas por perforaciones, fisuras, daños, mal estado de las redes de captación, tratamiento y distribución (pérdidas técnicas). No hacen parte de los flujos de retorno las conexiones clandestinas, o los errores de medición (pérdidas comerciales) (IDEAM, 2015a).
- **Recirculación:** Utilizar indefinidamente una misma agua para un mismo fin, compensando únicamente las pérdidas por purgas o evaporación (CORANTIOQUIA, n.d.).
- **Requerimiento hídrico** de un cultivo: volumen de agua necesaria para que el cultivo no sufra estrés hídrico (elaboración propia).
- **Requerimiento de riego:** cantidad de agua requerida para suplir el déficit de humedad en el suelo, durante el periodo vegetativo (IDEAM, 2010a)
- **Reúso:** es la utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos para el uso al que se va a destinar (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)

SIGLAS

- ADR - Agencia de Desarrollo Rural
- ARD – Aguas Residuales Domésticas
- ARnD – Aguas Residuales No Domésticas
- AH - Área hidrográfica
- AIDIS – Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
- APW – Productividad Aparente del Agua (por sus siglas en inglés)
- ASOBIOCOL - Agronomía Colombiana de Bio-insumos para la Transformación del Agro
- ASOCAÑA - Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia
- AUA – Asociaciones de Usuarios del Agua
- AUGURA - Asociación de Bananeros de Colombia
- CAR – Corporaciones Autónomas Regionales
- CEPAL – Comisión Económica para América y el Caribe
- CINARA – Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico
- CNA - Censo Nacional Agropecuario
- CRA - Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico
- CPN – Censo Pecuario Nacional
- CTA – Corporación Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia
- CONPES – Consejo Nacional de Política Económica y Social
- CORPOICA - Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística
- DBO – Demanda Biológica de Oxígeno
- DQO – Demanda Química de Oxígeno
- DNP – Departamento Nacional de Planeación
- EAI – Encuesta Ambiental Industrial
- EAM – Encuesta Anual Manufacturera
- ENA – Estudio Nacional del Agua
- EPA – Environmental Protection Agency of United States
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- FEDEARROZ - Federación Nacional de Arroceros
- FEDEGAN - Federación Colombiana de Ganaderos
- FEDEPALMA - Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite
- FENAVI - Federación Nacional de Avicultores de Colombia
- HIMAT - Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras
- IBUN - Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional
- IACAL – Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua
- IANC - Índice de Agua No Contabilizada
- IARC – Índice de Agua No Retornada a la Cuenca
- ICA – Instituto Colombiano Agropecuario
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
- INAT - Instituto Nacional de Adecuación de Tierras
- INCODER - Instituto Colombiano de Desarrollo Rural

- IPHE - Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas
- IRH - Índice de regulación hídrica
- IUA – Índice de Uso del Agua
- IVH - Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico
- IWA - International Water Association
- MADS - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
- Minagricultura - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
- Mm – Millones de metros
- N_T – Nitrógeno total
- OMS – Organización Mundial de la Salud
- PIB - producto Interno Bruto
- PORCICOL – Asociación Colombiana de Porcicultores
- P_T – Fósforo total
- PTAR – Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
- RAS - Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico
- RUA – Registro Único Ambiental
- SIGOT - Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial
- SIMCO – Sistema de Información Minero Colombiano
- SIPRA - Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria
- SNCTA - Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología Agroindustrial
- SSPP - Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
- SST – Sólidos Suspendidos Totales
- ST – Sólidos Totales
- STAR - Sistema de Tratamiento de Agua Residual
- SUI – Sistema Único de Información
- SZH - subzonas hidrográfica
- TMR Transferencia del Manejo del Riego
- TR – Tasa Retributiva
- TUA – Tasa por Utilización de Agua
- UPM – Unidad Productora Minera
- UPME – Unidad de Planeación Minero Energética
- UPRA – Unidad de Planificación Rural Agrícola
- WAVES - Alianza Mundial para la Contabilidad de la Riqueza y la Valoración de los Servicios de los Ecosistemas (por sus siglas en inglés)

1 INTRODUCCIÓN

El aumento de la presión sobre los recursos naturales que se espera a medida que la población y economía mundial se expanden, están generando cambios rápidos en el clima y la biósfera, que han creado nuevos desafíos para superar la pobreza y promover el desarrollo sostenible (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2016). El **Crecimiento Verde** (CV) es un enfoque que propende por un desarrollo sostenible que garantice el bienestar económico y social de la población en el largo plazo, asegurando que la base de los recursos naturales mantenga la capacidad de proveer los bienes y servicios ambientales que soportan la base económica del país y puedan continuar siendo fuente de crecimiento y bienestar hacia el futuro.

Bajo un enfoque de CV, las políticas y los mercados deben apuntar hacia opciones de desarrollo que superen retos, al tiempo que eviten un mayor deterioro e impactos irreversibles sobre las capacidades de los países, para alcanzar el bienestar social. Catalizar las inversiones en tecnologías y prácticas más limpias y de menor impacto socio-ambiental, así como promover la prosperidad económica, la inclusión social y la sostenibilidad ambiental a largo plazo, constituye el núcleo de una trayectoria de CV (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2016).

En el marco del Plan de Desarrollo 2014 – 2018 “Todos por un nuevo país”, se definió como meta la formulación de la **Misión de Crecimiento Verde** (MCV), iniciativa liderada por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), la cual busca definir los insumos y lineamientos de política pública para orientar el desarrollo económico del país hacia el año 2030. La Misión producirá las bases técnicas para la formulación de la Política de CV de largo plazo y tiene como objetivos:

- Promover la competitividad económica.
- Proteger y asegurar el uso sostenible del capital natural y de los servicios de los ecosistemas
- Promover un crecimiento económico resiliente ante los desastres y el cambio climático.
- Asegurar la inclusión social y el bienestar.

Para el logro de estos objetivos se realizarán estudios de diagnóstico y de prospectiva y se identificarán opciones de política pública para incorporar el enfoque de CV en la planificación del desarrollo económico, teniendo en cuenta los siguientes ejes temáticos:



Fuente: (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2017b)

Uno de los ejes temáticos corresponde al uso eficiente de los recursos, que incluye la productividad del agua, la cual bajo el enfoque de la MCV pretende a futuro consolidar una política capaz de promover un crecimiento económico sectorial en equilibrio con las condiciones hídricas y considerando el impacto de fenómenos de escala global como el Cambio Climático

En palabras del director del DNP "en Colombia usamos ineficientemente el agua, falta gran desarrollo, tecnologías y mejores prácticas por parte de todos los usuarios del recurso para garantizar su oferta y calidad, y más aun considerando las presiones y baja oferta hídrica que existe en departamentos de las regiones Andina y Caribe. El CV es el camino para afrontar el nuevo reto del Siglo XXI: mantener la abundancia de recursos y reducir el riesgo de escasez".

El CV se hace urgente para el país porque Colombia debe afrontar sus problemas ambientales, generando acciones claras y contundentes para mejorar su sostenibilidad, la cual implica realizar acciones a nivel ambiental, social y económico, y que deben estar soportadas por una política que las haga viables y ejecutables.

Hasta 1990 Colombia ocupaba el cuarto lugar en el mundo después de la Unión Soviética, Canadá y Brasil en mayor volumen de agua por unidad de superficie. El rendimiento hídrico promedio del país, según los expertos, era de 60 litros por kilómetro cuadrado, lo que era seis veces mayor que el rendimiento promedio mundial y tres veces el de Suramérica. Sin embargo, este potencial hídrico se restringe en su aprovechamiento por factores antrópicos que afectan el ciclo hidrológico y en particular en la calidad del agua. También lo afecta la forma de aprovechamiento que se caracteriza por el uso inadecuado y poco eficiente (Red Interamericana de Academias de Ciencias - IANAS y el Foro Consultivo Científico y Tecnológico -AC, 2012).

El objetivo de la MCV del DNP, busca precisamente avanzar hacia la formulación de políticas, y en el caso del eje de productividad del agua, se espera generar los aportes para dicha política, para lo cual el DNP, la Agencia Francesa para el Desarrollo y el Fondo Acción, suscribieron con el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), una consultoría para determinar los factores que inciden en la productividad del agua en los sectores agrícola, pecuario, agua potable, industrial manufacturero y minero, con el fin de proponer acciones de política para modificar los aspectos determinantes de esas condiciones.

Para lograr este objetivo, el primer paso a seguir es la elaboración del diagnóstico que dé cuenta del estado de la productividad del agua, el tratamiento de aguas residuales y el reúso de agua en Colombia, analizando los siguientes sectores económicos: agrícola, pecuario, agua potable, industrial manufacturero y minero, definidos para la consultoría.

Este diagnóstico tiene como objetivo general **identificar el estado actual de la productividad del uso del agua, la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales y en el reúso del agua en Colombia, que sirva como insumo a la definición de lineamientos y recomendaciones para mejorarlas y ser consideradas en la formulación de la Política de CV** de largo plazo en el marco de la MCV; y para lograr este objetivo, es necesario:

- Identificar las causas y los factores determinantes que inciden en la productividad del uso del agua y en la eficiencia y cobertura del tratamiento de aguas residuales.

- Identificar el potencial, los factores determinantes y las regiones estratégicas para el reúso del agua.

Este documento es, por tanto, el compendio de los análisis realizados en dicho diagnóstico, el cual se presenta de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se observa el marco conceptual, en el cual se presentan las definiciones relacionadas con los conceptos de demanda, productividad, eficiencia, tratamiento de aguas residuales y reúso de agua, al igual que un contexto general sobre dichos conceptos. Los capítulos 2 a 6, contienen información sectorial (agrícola, pecuario, industrial manufacturero, agua potable y minero) sobre la caracterización del uso del agua en los procesos productivos con base a los conceptos presentados en el capítulo 1, incluyendo los factores que inciden en ellos de acuerdo con unos criterios TEPAS: tecnológicos, económicos, políticos, ambientales y sociales. En el capítulo 7 se presenta el análisis del tratamiento de aguas residuales con énfasis en los factores que inciden en la descarga de vertimientos a nivel sectorial, aspectos que afectan la eficiencia en el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, y el análisis de los costos de construcción, operación y mantenimiento de dichos sistemas. En el capítulo 8, se evalúa el potencial de reúso y las condiciones para la recirculación o el tratamiento de aguas residuales para mejorar la eficiencia y la productividad del agua sectorial de acuerdo con la disponibilidad del recurso hídrico por subzona hidrográfica (SZH), así como las posibles incidencias del cambio climático y la variabilidad climática. En el capítulo 9 se hace una identificación de los instrumentos económicos para la gestión integral del recurso hídrico y un análisis del efecto de la Tasa Retributiva (TR) sobre las descargas de vertimientos en Colombia. Finalmente, el capítulo 10 presenta las conclusiones del diagnóstico.

2 MARCO CONCEPTUAL

La gestión sostenible del agua, las infraestructuras del agua y el acceso a un suministro seguro, confiable y asequible de agua y servicios de saneamiento adecuados mejoran el nivel de vida, expanden las economías locales y promueven la inclusión social. La gestión sostenible del agua es también un motor esencial para el crecimiento verde y el desarrollo sostenible (WWAP United Nations World Water Assessment Programme, 2016).

Esta gestión sostenible del agua requiere un mejoramiento de las problemáticas a las que el país se enfrenta, asociadas a la disponibilidad del recurso hídrico en términos de cantidad y calidad, es por eso por lo que se debe apuntar a mejorar la productividad del agua y al reúso de agua para hacer un uso más eficiente del recurso, así como al mejoramiento de las condiciones para el tratamiento de aguas residuales buscando un resultado de calidad de las fuentes hídricas más adecuado.

En términos de oferta hídrica, a pesar de la reducción en el rendimiento hídrico como se menciona en la introducción, Colombia sigue siendo potencia hídrica en términos de cantidad, sin embargo, este recurso no está distribuido de manera equitativa ni se encuentra disponible por condiciones asociadas a la calidad del mismo.

Esa distribución inequitativa y la reducción del rendimiento hídrico es un llamado para avanzar hacia una gestión eficiente de la **demanda hídrica**, entendida ésta como *“La sustracción de agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades y los requerimientos de consumo humano, producción sectorial y demandas esenciales de los ecosistemas existentes sean intervenidos o no. La extracción y, por ende, la utilización del recurso implica sustracción, alteración, desviación o retención temporal del recurso hídrico, incluidos en éste los sistemas de almacenamiento que limitan el aprovechamiento para usos compartidos u otros usos excluyentes”* (IDEAM, 2010a), y es claro que esta gestión debe tener en cuenta las necesidades de los sectores económicos, ya que todos tienen necesidades diferentes.

Es innegable que la demanda de agua a nivel mundial, como se observa en la Figura 1, está requerida en mayor porcentaje por el sector agrícola (70%), seguido del sector energético (15% y doméstico (10%); panorama que no es muy diferente en Colombia, en la cual el mayor porcentaje de la demanda está requerido por el sector agrícola (46,6%), seguido del energético (21,5%), el pecuario (8,5%) y el doméstico (8,2%).

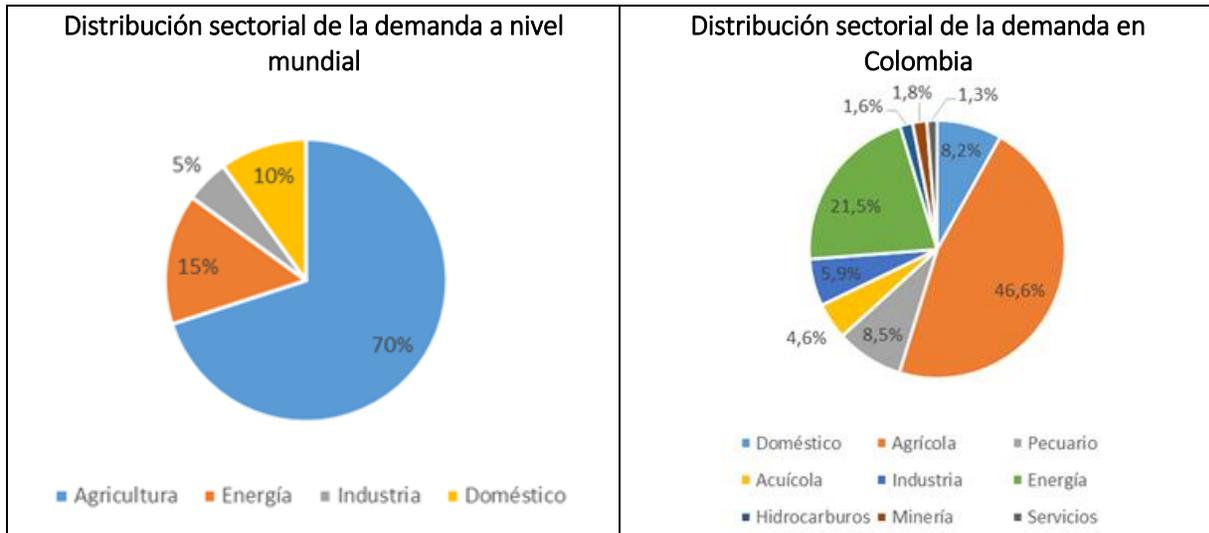


Figura 1. Demanda hídrica sectorial
Fuente: (IDEAM, 2015a; UNESCO, 2016)

Este panorama puede ir mostrando los sectores en los que hay una mayor demanda de agua; sin embargo, esto debe analizarse con mayor detalle, ya que no necesariamente toda la demanda de agua es utilizada en el proceso, retorna a la cuenca, ni necesariamente es extraída de la misma fuente. Es por esto que en Colombia se ha avanzado en estos análisis y se ha involucrado el concepto de **huella hídrica**, que de acuerdo con el IDEAM (2015), se define como *“el volumen usado de agua para un proceso antrópico que no retorna a la cuenca de donde fue extraída o retorna con una calidad diferente a la original”*. La huella hídrica tiene tres componentes para su análisis, la huella hídrica azul (HHA), la huella hídrica verde (HHV) y la huella hídrica gris (HHG). Para el caso de este estudio se hará un especial énfasis en la HHA, definida en el ENA 2014 (IDEAM, 2015a) como *“La apropiación humana de agua de los sistemas hídricos superficiales, subsuperficiales y subterráneos para un uso antrópico que no retorna a la cuenca origen”*.

En términos de huella hídrica, la HHA responde solo al 3% de manera multisectorial, mientras que la HHV es del 97% asociada a los sectores agrícola y pecuario. Del 3% de la HHA azul, el 70% corresponde al sector agrícola, seguida por los trasvases de agua entre cuencas.

Para hacer una mejor gestión de esta demanda, es necesario analizar la eficiencia en el uso del agua en cada uno de los sectores que la demandan, en este sentido, tomando la definición propuesta por la UNESCO (UNESCO, 2016), se considera la **eficiencia** como la proporción de agua que se utiliza para lograr un resultado económico, un producto o actividad (m³ de agua por unidad de producto), por tanto se considera que hay eficiencia mejorada cuando se usa menos agua para obtener los mismos bienes o servicios. Esto significa que se aprovecha eficientemente no solo los limitados recursos hídricos sino también los demás recursos naturales, humanos y financieros.

Las eficiencias de los sectores económicos pueden verse afectadas, por aspectos como las **pérdidas**, las cuales se definen como los *volúmenes de agua estimados de fugas y filtraciones causadas por perforaciones, fisuras, daños, mal estado de las redes de captación, tratamiento y distribución* (pérdidas técnicas); es decir el sistema de distribución para el proceso productivo es fundamental en el análisis.

Parte del volumen usado de agua en cada proceso productivo se reincorpora o es devuelto a la red de drenaje de la cuenca como remanente de los volúmenes usados o aprovechados en los procesos productivos de las actividades económicas, lo cual se define como **recirculación** (utilización indefinidamente de una misma agua para un mismo fin, compensando únicamente las pérdidas por purgas o evaporación (CORANTIOQUIA, n.d.)), mientras que el agua que no fue utilizada en el proceso productivo se retorna a las fuentes hídricas, incluyendo las pérdidas. Ambos se definen como **Caudal o flujo de Retorno** (IDEAM, 2015a).

El vertimiento de los procesos de cada sector podría ser utilizado en otras actividades como **reúso del agua**, definido como la utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos para el uso al que se va a destinar (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), el cual tiene características y condicionantes diferentes para sector económico. En diferentes países del mundo, el reúso se ha convertido en una opción para mejorar la gestión del recurso hídrico. En la Tabla 1, puede observarse como Estados Unidos tiene un volumen importante de agua reusada.

Tabla 1. Reúso de agua en algunos países del mundo

País	Volumen de aguas residuales reusada (millones de m ³ /año)	Principal uso
España	350	Riego agrícola y uso urbano
Italia	225	
Alemania	40	
Grecia	20	
Estados Unidos	3380	Riego de cultivos, campos de golf y en sectores comerciales e industriales
América Latina	876	Actividades agrícolas e industriales

Fuente: (AIDIS, 2016)

Sector agrícola

Corresponde a la producción de materias primas de origen vegetal a través del cultivo. Incluye los cultivos desde el momento de su siembra hasta la cosecha¹. Para evaluar la eficiencia y productividad del agua, es necesario entender que su uso está relacionado directamente con el requerimiento hídrico de los cultivos (volumen de agua necesaria para que el cultivo no sufra estrés hídrico). Éste puede ser suplido por agua lluvia que queda almacenada en el suelo como humedad, denominada agua verde, o por medio de riego a través de la extracción de agua azul (flujo horizontal de agua de escorrentía, de fuentes superficiales: ríos y lagos o fuentes de agua subterráneas: acuíferos)².

El requerimiento de riego, es la cantidad de agua necesaria para suplir el déficit de humedad en el suelo, durante el periodo vegetativo (IDEAM, 2010a) y se estima mediante el análisis de las necesidades de evapotranspiración del cultivo, con relación al volumen de agua que no puede ser suplido por agua verde. Su cuantificación involucra el análisis de las características fenológicas del cultivo, del clima y del tipo de suelo. Este concepto es importante diferenciarlo del concepto de demanda hídrica.

¹ No se consideran las actividades de post-cosecha y transformación de la materia prima, las cuales se relacionan con procesos industriales

² Los conceptos de agua azul y agua verde han sido integrados en el ENA 2014, mediante el concepto de huella hídrica.

Este último concepto se refiere a la extracción de agua azul, el cual incluye a la HHA y corresponde teóricamente a la relación entre el requerimiento de riego y la eficiencia de los sistemas de riego, es decir que incluye tanto el requerimiento de riego como las pérdidas de agua (IDEAM, 2015a).

En este sentido, la eficiencia y la productividad del sector agrícola están directamente relacionadas con las buenas prácticas agrícolas en cuanto al manejo adecuado de los requerimientos hídricos de los cultivos, y en aquellos casos donde sea necesario aplicar riego para complementar dicho requerimiento, estarán relacionadas con el buen desempeño de los sistemas de riego.

Sector pecuario

El uso del agua en este sector hace referencia al consumo vital de agua³ de los animales en las etapas de cría y levante, sumado al agua de servicio (consumo en labores de limpieza en los lugares de alojamiento). A este requerimiento se le conoce usualmente como demanda y se define en términos de consumo del agua del hato (litros/cabeza/unidad de tiempo) (IDEAM, 2010).

La eficiencia y la productividad de este sector, están directamente relacionadas, por un lado, con los factores que afectan el desarrollo adecuado de los animales, es decir variables como el tipo de raza, el estado del animal (cría o levante), la edad del animal, la temperatura, así como si está en pastoreo o confinamiento, es decir con las variables que condicionan el consumo vital del animal; y por otro lado con las prácticas de limpieza que se apliquen en el hato y el buen desempeño de los sistemas que se usen.

Sector agua potable

El recurso hídrico en este sector, se refiere al agua que es utilizada en actividades tales como bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato; para satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios; y para preparación de alimentos en general, y en especial, los destinados a su comercialización o distribución, que no requieran elaboración (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente, 2010).

La Ley 142 de 1994⁴, define el servicio público domiciliario de acueducto, llamado servicio público domiciliario de agua potable, como la distribución municipal de agua apta para el consumo humano, incluida su conexión y medición. La Ley se aplica a las actividades complementarias tales como captación de agua y su procesamiento, tratamiento, almacenamiento, conducción y transporte (SSPD, 2012).

La eficiencia en el sector está asociada a los volúmenes de pérdidas de agua que se presentan tanto en los procesos técnicos como comerciales en un sistema de acueducto. La ley 142 de 1994 establece que, en el marco tarifario de servicios públicos, se tendrá en cuenta “...un nivel de pérdidas aceptable según la experiencia de otras empresas de servicios públicos eficientes”. Al respecto, la CRA ha establecido que, el nivel máximo de pérdidas de agua que se aceptará para el cálculo de los costos de prestación del servicio de acueducto será del 30% (SSPD, 2015).

³ Agua requerida por el animal para su adecuado desarrollo fisiológico

⁴ “Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones”.

Sector industrial manufacturero

En el Decreto 3930 de 2010⁵ se define el recurso hídrico en el sector industrial como el agua que es usada en procesos de transformación o explotación, así como aquellos conexos y complementarios. En el ENA 2014 (IDEAM, 2015a), se incluyó además, en el análisis del uso del agua en el sector industrial manufacturero, el sacrificio bovino, porcino y aves, haciendo referencia a la información empleada del Registro Único Ambiental (RUA).

La eficiencia del sector está asociada al uso adecuado del recurso hídrico y el funcionamiento de los diferentes sistemas usados en el proceso, evitando pérdidas o fugas en el mismo. Igualmente, está relacionado con el volumen de agua que sale del proceso, el cual puede ser ingresado nuevamente como un volumen de recirculación, y según los requerimientos de calidad del agua, podría involucrar un tratamiento previo. El volumen de agua que sale del proceso se convierte en el afluente del sistema de tratamiento de agua residual industrial (STAR) o bien, puede ser vertida sin ningún tipo de tratamiento cumpliendo los estándares de calidad (Resolución 0631 de 2015) o podría ser reusada en otro proceso diferente, cumpliendo con lo establecido en la Resolución 1207 de 2014 del MADS.

Sector minero

El uso del agua en este sector está relacionada principalmente a las etapas de explotación, beneficio de los minerales y en el control ambiental. Dependiendo de las características de la minería (cielo abierto o subterránea) y del tipo de mineral (oro o carbón), el uso del agua presenta variaciones importantes.

Es necesario resaltar la relación entre el uso del agua (cantidad y calidad) en función de la legalidad de la actividad minera. Para el caso de la minería ilegal e informal⁶, por sus características propias de cómo se desarrolla en el territorio, es complejo para las autoridades mineras y ambientales realizar un seguimiento al comportamiento de este tipo de minería y su relación con el recurso hídrico. Por lo tanto, actualmente no se dispone de un registro histórico oficial que permita diferenciar la productividad y eficiencia del agua para la minería ilegal e informal. Sin embargo, desde las líneas estratégicas de la Política Minera de Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2016), se tiene definido un programa de formalización, reconversión y control para garantizar que en primera medida la actividad ilegal e informal se legalice y en consecuencia esta minería ya sea objeto de seguimiento y control por parte de las autoridades mineras y ambientales. Para el caso específico de este documento, solo se utilizan datos reportados en estudios publicados por entidades públicas.

La eficiencia en el uso del agua en términos de cantidad está orientada en controlar los sistemas de medición, la infraestructura de las captaciones de agua, en la reducción de pérdidas en las conducciones, control en las operaciones susceptibles a evaporación (cianuración y control de material particulado), uso de tecnologías eficientes, aprovechamiento del agua de desagüe, entre otras.

⁵ Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 111-Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Colombia

⁶ De acuerdo con el Glosario Técnico Minero (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2015), se define la minería ilegal como la minería desarrollada sin estar inscrita en el Registro Minero Nacional y, por lo tanto, sin título minero. Es la minería desarrollada de manera artesanal e informal, al margen de la ley. También incluye trabajos y obras de exploración sin título minero. Incluye minería amparada por un título minero, pero donde la extracción, o parte de ella, se realiza por fuera del área otorgada en la licencia. La minería informal es aquella constituida por las unidades de explotación pequeñas y medianas de propiedad individual y sin ningún tipo de registros contables

Sin embargo, es bien conocido que, en el sector minero, el uso del agua no está ligado solo a la cantidad, ya que un porcentaje importante, retorna al medio ambiente, no obstante, las condiciones en que regresa no son las mejores en cuanto a calidad, afectando la disponibilidad del recurso para otras actividades económicas. Estas razones hacen que tanto la productividad como la eficiencia del sector, requieran ser evaluadas teniendo en cuenta los análisis de cantidad y calidad.

El análisis de la generación de aguas residuales es un producto inevitable de las diferentes actividades económicas, éstas, según la Resolución 631 de 2015, pueden dividirse en **Aguas Residuales Domésticas (ARD)** y **Aguas Residuales no Domésticas (ARnD)**, las primeras se definen como las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y las ARnD son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas. Estas aguas residuales, pueden ser recolectadas y conducidas a una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), de esta manera, el tratamiento y disposición adecuada de las aguas residuales supone el conocimiento de sus características físicas, químicas y microbiológicas y de los efectos que éstas pueden ocasionar sobre la fuente receptora.

El RAS 2000, define una PTAR como el “Conjunto de obras, instalaciones y procesos para tratar las aguas residuales” (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000b). En Colombia, los tratamientos más comunes son el tratamiento preliminar, tratamiento primario y tratamiento secundario, siendo este último enfocado en la remoción de materia orgánica, principalmente a partir de procesos biológicos y en una menor instancia los tratamientos terciarios.

El análisis de la aplicación de un tratamiento de aguas residuales aplicado a cada sector tiene en cuenta las características particulares de los vertimientos, así como los factores que influyen en los mismos, lo cual se explica en cada capítulo.

Todos estos elementos en torno a la eficiencia, productividad, tratamiento de aguas residuales y el reúso del agua, finalmente se analizan de manera integral en términos del territorio en el cual se desarrollan las actividades económicas, con el fin de validar en función de indicadores como el *Índice de Uso del Agua (IUA)* y el *Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL)*, así como los escenarios de cambio climático, las recomendaciones de acciones para mejorar cada uno de estos aspectos y de esta manera apuntarle a un crecimiento verde en el país.

2.1 PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

El agua es fundamental para el desarrollo económico y social no solo como un factor de producción, sino como un bien necesario para mantener a la población en condiciones de vida dignas. En ese sentido si se busca analizar la productividad del agua, es necesario tener claridad sobre los usos de la misma y entenderla no solo como un factor de producción, sino también como un factor que evita costos futuros.

Analizar la productividad del agua es un tema relativamente reciente a nivel mundial, que nace a partir de la escasez del recurso hídrico y de la necesidad de hacer de su uso lo más eficiente posible. De hecho,

la mayor parte de la superficie del planeta (70%) está cubierta por agua. Sin embargo, apenas un 3% del total es agua dulce, y en su mayor parte se halla inaccesible en forma de hielo (Olmeda, 2006).

Claramente un análisis de productividad, eficiencia y escasez es un análisis socioambiental y económico. Para iniciar se debe tener claro qué tipo de bien es el agua y cuál es su relación con la actividad económica para poder entender cuál es la posible vía por medio de la cual transmite valor a otros bienes o evita costos a la sociedad.

El agua es un recurso natural y renovable, se podría pensar como un bien libre y no económico, por lo tanto, gratuito. Pero el rápido crecimiento de la población y con ella de la demanda del recurso, está generando problemas de escasez, lo que hace que se deba introducir el análisis económico al agua (Olmeda, 2006). La escasez del agua se puede clasificar en tres categorías según la FAO (citada en ONU, 2016): (1) escasez de agua física; (2) escasez de agua económica por falta de infraestructura debido a limitaciones financieras o técnicas, independientemente del nivel de los recursos hídricos; (3) escasez de agua institucional debido a que las instituciones no han cumplido a la hora de proveer al usuario con un suministro de agua confiable, seguro y equitativo (ONU, 2016). Situación que se agrava si se considera que mientras el recurso hídrico se hace escaso, la población mundial sigue creciendo, lo que hace que la disponibilidad de agua por persona sea cada vez menor.

Teniendo claro que el agua es un bien socioambiental y económico escaso y altamente demandado, si se pretende establecer la productividad del agua, primero se debe tener claro cuáles son los usos del agua y los beneficios económicos derivados de ellos, para luego cuantificarlos de ser posible.

Uno de los principales usos del agua está en la producción de bienes y servicios, en ese sentido la productividad del agua está relacionada con el crecimiento económico de los países. El Banco Mundial reconoce esta relación entre agua y crecimiento, por lo que propone como indicador de productividad del agua, el cociente entre el valor del Producto Interno Bruto (PIB) y la demanda de agua dulce, lo que permite conocer el valor agregado por metro cúbico de extracción de agua dulce. Un indicador que, si bien reconoce la participación del agua en la economía, no toma en cuenta los costos evitables para la sociedad que se logran a partir de la disponibilidad del agua, y tampoco toma en cuenta la participación del agua no extraída en la economía, como por ejemplo el agua de los grandes ríos que permite el transporte fluvial.

Si bien las dinámicas entre el agua, el crecimiento económico y el empleo son complejas y muy dependientes de las circunstancias físicas, culturales, políticas y económicas específicas (ONU, 2016), varios estudios han reconocido una relación positiva entre el agua y el crecimiento económico. Olmeda 2006 estudió la relación entre agua y crecimiento económico a nivel microeconómico y macroeconómico. A nivel micro se analiza los mercados de agua, la formación de precios, las elasticidades por tipo de uso y la eficiencia (Olmeda, 2006). A nivel macro se pregunta cómo es la relación entre la disponibilidad de agua y el crecimiento o si la actividad económica es la responsable de la escasez de agua (Olmeda, 2006).

Olmeda entonces propone un modelo de crecimiento donde una de las variables explicativas es la tasa de utilización de agua (como medida de la extracción), encontrando para una muestra de 143 países que a medida que el agua se hace más escasa, es decir, que aumenta la extracción, las tasas de crecimiento esperadas disminuyen.

Relacionado también con la actividad económica, pero no medido en la producción, otro beneficio derivado del agua es la generación de empleo. La ONU presentó en 2016 su informe sobre desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, titulado en esta ocasión Agua y Empleo. La relación entre el agua y el empleo sustenta la promesa de un crecimiento económico inclusivo y sostenible para todos los países (ONU, 2016). Dado que el agua es un insumo para la producción de bienes y servicios, de su disponibilidad depende el funcionamiento de múltiples actividades económicas y la generación de la gran mayoría de empleos en el mundo. La ONU estimaba que para el año 2016 más del 40% de la población económicamente activa estaba trabajando en un empleo altamente dependiente del agua, como los empleos de los sectores agricultura, pesca, minería, generación de energía, saneamiento básico, entre otros, en tanto que otro el 40% de la población económicamente activa tenía un trabajo en un sector medianamente dependiente del agua como la construcción, el ocio, el transporte, entre otros.

Estas cifras dan cuenta de la importancia del agua para la generación de empleo y bienestar social, entonces la extracción desmedida del recurso hídrico pone en peligro el sostenimiento de las actividades económicas en el futuro y el sostenimiento de los empleos.

Además de los empleos generados por la disponibilidad del agua en los sectores económicos dependientes del agua, la creciente preocupación por garantizar una oferta de agua suficiente tanto en cantidad como en calidad hace que se generen nuevos empleos en el sector agua. Los empleos del sector agua pertenecen a una de estas tres categorías: i) gestión de los recursos hídricos, incluida la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) y la restauración y rehabilitación de ecosistemas; ii) construcción, uso y mantenimiento de las infraestructuras hídricas; y iii) la prestación de servicios relacionados con el agua, incluido el suministro de agua, el saneamiento y la gestión de aguas residuales (ONU, 2016).

Esto plantea la pregunta de si los indicadores de productividad del agua deberían tener en cuenta el número de empleados dependientes del agua de forma directa o indirecta y el ingreso percibido por ellos.

Pasando a la productividad del agua desde el punto de vista de costos evitables se presentan dos casos: uno relacionado con la salud y otro con el medio ambiente. Como el agua es fundamental para la vida, la vida se logra mantener en el tiempo en parte a la buena salud, entonces es posible decir que la salud y el agua están estrechamente relacionados. La Organización Panamericana de la Salud (OPS) habla de dos tipos de uso del agua según su calidad: usos de alta calidad que están relacionados con el consumo humano (alimentos, higiene personal y para el lavado de ropa y platos) y los usos de menor calidad como usos recreativos, industriales y agrícolas (OPS, 1999).

Observando detenidamente, se tiene que los usos que requieren una alta calidad del agua están altamente ligados con la salud humana, razón por la cual la disponibilidad de agua apta para el consumo humano es fundamental para la salud y permite la reducción de enfermedades transmisibles por el agua y por ende el gasto en salud tanto de las personas como del Estado.

El consumo de agua sin las condiciones de calidad adecuadas tiene riesgos para la salud a mediano y largo plazo tales como: contaminación microbiológica, química y relacionada con toxinas (OPS, 1999). Entonces el consumo de agua no apta, puede causar deterioro de la salud e incluso la muerte prematura,

razón por la cual la disponibilidad de agua no contaminada y sistemas de saneamiento básico es fundamental.

Esto abre la pregunta de si un indicador de productividad del agua debería tener en cuenta la relación entre agua y salud, introduciendo los costos de enfermedad a causa de consumo de agua contaminada o a causa del consumo altamente racionado del agua, además de tener en cuenta el ingreso que dejan de percibir las personas a causa de una enfermedad que les impide trabajar o incluso a causa de una muerte prematura.

Otro uso fundamental del agua se refiere a los servicios ecosistémicos que ofrece. El agua constituye una parte esencial de todo ecosistema, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Una reducción del agua disponible ya sea en la cantidad, en la calidad, o en ambas, provoca efectos negativos graves sobre los ecosistemas (ONU, 2003).

Entonces la productividad del agua también debería estar relacionada con su capacidad de mantener el equilibrio natural que garantiza la sostenibilidad de los ecosistemas y de la vida misma. Pero los servicios ecosistémicos del agua se ven deteriorados por dos vías: la primera es una reducción de los volúmenes de agua de las fuentes naturales y la segunda el deterioro de la calidad del agua vía contaminación. Ambas generadas por la actividad humana. Algunas actividades humanas que deterioran los servicios ecosistémicos del agua son: crecimiento demográfico y el consumo, desarrollo de la infraestructura (presas, canales, diques, desvíos, etc.), conversión de tierras, exceso de cosecha y explotación, introducción de especies exóticas, descargas contaminantes en tierra, aire o agua (ONU, 2003).

El deterioro de los ecosistemas lleva un costo para la sociedad en término de la reducción de la productividad de los recursos naturales y del costo de recuperación de los ecosistemas. Esto abre la pregunta de si estos costos de recuperación deberían ser tomados en cuenta a la hora de calcular la productividad del agua.

La relación del agua con el empleo, la salud y los servicios ecosistémicos y como afecta el cálculo de la productividad de esta, se puede expresar con un ejemplo. Si se piensa en el sector de la minería, se entiende que este sector tiene un alto nivel de valor agregado, por lo que al calcular el índice de productividad del agua como el PIB del sector sobre la demanda de agua se obtiene que la minería es un sector donde el agua es altamente productiva, pero si en este cálculo se tuviera en cuenta que otros sectores demandan más mano de obra que la minería y que las condiciones de empleo son mucho mejor, que el agua usada en la minería regresa a las fuentes de agua altamente contaminada y pone en riesgo la salud de la población aguas abajo, y que esta misma agua contaminada altera el equilibrio ecosistémico, seguramente el índice de productividad del agua en el sector minero se reduciría considerablemente.

Todo lo anterior apoya el interés de la comunidad internacional en potenciar en los países el crecimiento verde. Crecimiento verde significa fomentar el crecimiento y el desarrollo económico y al mismo tiempo asegurar que los bienes naturales continúen proporcionando los recursos y los servicios ambientales de los cuales depende nuestro bienestar. Para lograrlo, debe catalizar inversión e innovación que apunten al crecimiento sostenido y abran paso a nuevas oportunidades económicas (OCDE, 2011).

Para el crecimiento verde es entonces fundamental potenciar la eficiencia y la productividad del uso de los recursos naturales, entre ellos el agua en los sectores económicos. Específicamente en temas de

eficiencia y productividad del agua, es necesario lograr que los sectores implementen tecnologías de producción que demanden menos agua por unidad de producto (eficiencia) y que generen una menor cantidad de vertimientos contaminantes a las fuentes hídricas, junto con la implementación de estrategias para el tratamiento y reúso del agua, lo que garantiza la sostenibilidad de los agentes económicos y al mismo tiempo reduce las externalidades negativas ya mencionadas como el deterioro de la salud humana y de los ecosistemas. Además de hacer sostenible la actividad económica a futuro garantizando la disponibilidad del recurso hídrico.

2.2 MEDICIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD

Los conceptos de pérdidas, recirculación y reúso de agua, así como los vertimientos productos de cada proceso productivo pueden condicionar la eficiencia del mismo y por tanto afectar la productividad. La productividad del agua puede medirse en términos físicos (unidad/m³) y/o económicos (\$/m³). En términos económicos permite relacionar el valor agregado de las actividades económicas frente a la cantidad de agua usada en los procesos productivos, en ese sentido, entre mayor sea la relación, se puede hablar de niveles mayores de productividad y viceversa.

En términos físicos, el indicador permite medir eficiencias, puesto que relaciona el producto final frente a la cantidad de agua usada para el mismo. En cualquiera de los dos casos, la interpretación del indicador debe complementarse con el análisis de las variables y factores que puedan influir en la productividad del agua; tales como las condiciones territoriales, ambientales, sociales, económicas, políticas, institucionales y tecnológicas.

Según la FAO, el término productividad del agua es usado exclusivamente para denotar la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor del agua consumida o desviada. El valor del producto podría ser expresado en diferentes términos: biomasa, grano, dinero. Por ejemplo, el enfoque del llamado «cultivo por gota», se refiere a la cantidad de producto obtenido por unidad de agua. Otro enfoque considera las diferencias en los valores nutricionales de los diferentes cultivos o que la misma cantidad de un cultivo alimenta más personas que la misma cantidad de otro cultivo⁷.

Para la Asociación Mundial del Agua (GWP por sus siglas en inglés) la productividad del agua es la proporción entre los beneficios netos y la cantidad de agua utilizada en el proceso de producción (unidades de producción por m³). La productividad mejorada del agua se refiere al incremento del beneficio obtenido del uso de una unidad de agua. Cuando el resultado es monetario se denomina productividad económica del agua (dólares estadounidenses por m³). Esta relación también ha sido utilizada para referirse al uso del agua en la agricultura en función a la nutrición, el empleo, el bienestar y el medioambiente⁸.

Según el Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica para el agua del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas⁹ define la productividad del agua como un indicador que

⁷ <http://www.fao.org/docrep/006/Y4525S/y4525s06.htm>

⁸ Tomado de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>

⁹ https://www.cepal.org/deype/publicaciones/externas/3/49453/SCAE-Agua-ES-SER-F-100_opt.pdf

proporciona una primera aproximación de las ganancias y pérdidas potenciales de una reasignación del agua. La productividad del agua también se interpreta como aproximación que refleja, a grandes rasgos, los beneficios socioeconómicos generados al asignar agua a una industria en particular; a veces se confunde erróneamente con el valor del agua.

Par el Banco Mundial, la productividad del agua se calcula como el PIB a precios constantes dividido por la extracción total de agua dulce anual (Ecuación 1). La fuente de información para estimar el indicador es la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, datos de AQUASTAT y cálculos del PIB del Banco Mundial y de la OCDE. Actualmente hay información desde 1967 hasta el 2014 para diferentes países del mundo¹⁰.

Ecuación 1. Productividad del agua dulce

$$PA = \frac{PIB}{ExtracAgua}$$

Donde:

PA: Productividad del agua dulce

PIB: Producto Interno Bruto a precios constantes

ExtracAgua: Extracción total de agua dulce (m³)

A nivel nacional, el DANE ha estimado el indicador de productividad hídrica (Ecuación 2), el cual es un indicador general de rendimiento en el uso del agua, que relaciona la generación de valor agregado por unidad de agua utilizada. El indicador es considerado como un indicador de rendimiento en el uso del agua y representa cuánto obtiene la economía derivado del uso del recurso natural. El periodo de medición es anual y se considera como una medida de la eficiencia del uso del agua por la economía (Departamento Nacional de Estadísticas, 2017).

Ecuación 2. Productividad hídrica

$$PI = \frac{VAjt}{(Ejt + Gjt) - (Fjt + Hjt)}$$

Donde:

PI: Productividad hídrica

VAjt: Valor agregado del sector *j* en el periodo de referencia *t*

Ejt: Extracción de agua del sector *j* en el periodo de referencia *t*

Gjt: Agua recibida de otras unidades económicas del sector *j* en el periodo de referencia *t*

Fjt: Agua suministrada a otras unidades económicas del sector *j* en el periodo de referencia *t*

Hjt: Retornos de agua de las unidades económicas al ambiente del sector *j* en el periodo de referencia *t*

Si bien no existe una única definición ni forma de estimar la productividad económica del agua, es cierto que de alguna forma los diferentes conceptos y fórmulas buscan determinar qué tanto influye el uso del

¹⁰<https://datos.bancomundial.org/indicador/ER.GDP.FWTL.M3.KD?end=2014&start=2014&type=shaded&view=map&year=2014>

agua en la economía. Máxime cuando es un insumo y materia prima fundamental en todas las actividades económicas y, por ende, cualquier tipo de acción, intervención, política que busque crecimiento económico verde, deberá considerar aspectos enfocados a aumentarla.

Estimaciones de la productividad económica del agua

– Productividad del agua dulce

A nivel mundial, según las estimaciones del Banco Mundial: Singapur, Luxemburgo y Guinea Ecuatorial son los países que cuentan con la mayor productividad del agua al 2014¹¹, con indicadores por metro cúbico superiores a los USD\$1.000 (Figura 2). A nivel latinoamericano, Brasil tiene el mejor indicador con USD\$32 por metro cúbico seguido de Colombia con USD\$30 por metro cúbico (Figura 3).

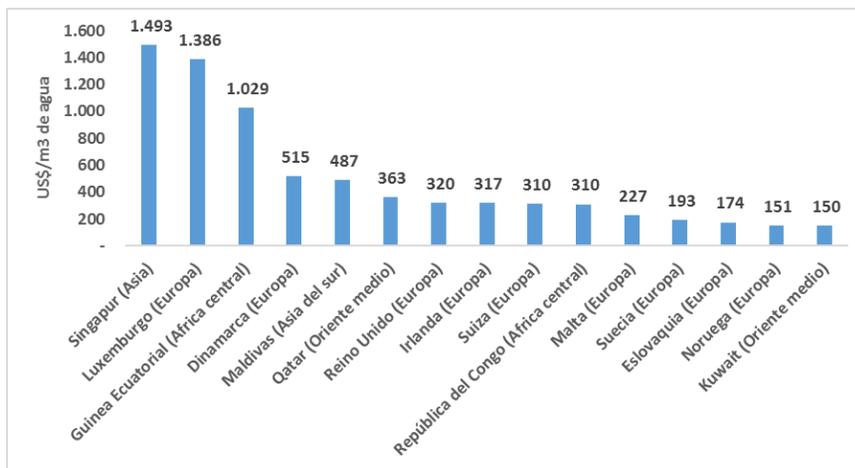


Figura 2. Productividad del agua a nivel mundial, total (PIB en USD\$ constantes del año 2014 por metro cúbico de extracción total de agua). Fuente: Banco Mundial

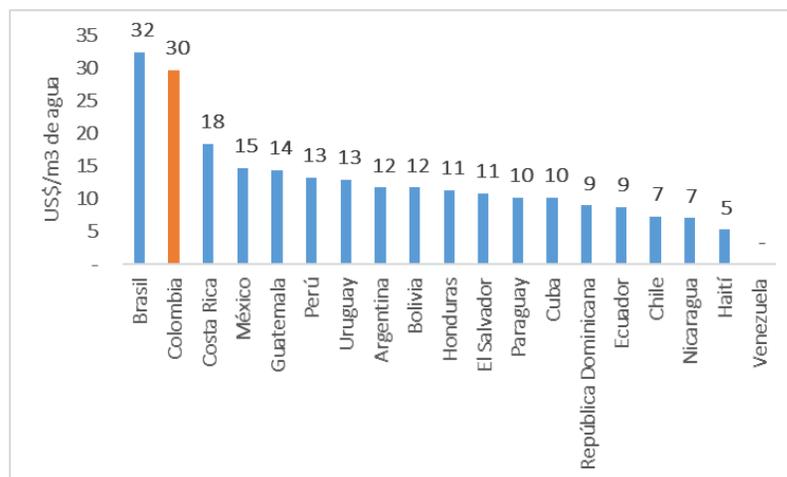


Figura 3. Productividad del agua en Latinoamérica, total (PIB en US\$ constantes del año 2014 por metro cúbico de extracción total de agua). Fuente: Banco Mundial

¹¹ Según los datos reportados por el Banco Mundial, 2014 es el último año reportado. https://datos.bancomundial.org/indicador/ER.GDP.FWTL.M3.KD?view=map&year_high_desc=false

El indicador de productividad del agua económica estimado por el Banco Mundial obedece principalmente a la actual preocupación mundial sobre el suministro de agua dulce. Actualmente hay zonas en el planeta que están experimentando estrés hídrico. Según las Naciones Unidas, se prevé que en 2030 el mundo tendrá que enfrentarse a un déficit mundial del 40% de agua en un escenario climático en que todo sigue igual. Además, a nivel regional, se informa que el límite global de sostenibilidad ecológica de agua disponible para su extracción, ha sido superado por una tercera parte aproximadamente de la población, y aumentará hasta aproximadamente la mitad hacia el año 2030 (Naciones Unidas, 2015).

En ese sentido, la capacidad de los países en desarrollo para hacer que haya más agua disponible para usos domésticos, agrícolas, industriales y ambientales dependerá de una mejor gestión de los recursos hídricos y una mayor planificación e integración intersectorial. Según el Consejo Mundial del Agua, para 2020, se espera que el uso del agua aumente en un 40 por ciento, y se requerirá un 17 por ciento más de agua para la producción de alimentos para satisfacer las necesidades de la creciente población. (Naciones Unidas, 2015).

De esta forma, la utilidad del indicador radica en la comparación que permite realizar entre países a nivel mundial y de esta forma, visibilizar aquellos que requieren políticas y mecanismos para una mejor gestión del recurso. Sin embargo, este indicador tiene varias limitaciones. Los datos sobre los recursos de agua dulce se basan en estimaciones de la escorrentía en los ríos y la recarga de aguas subterráneas; estas estimaciones se basan en diferentes fuentes y se refieren a años diferentes, por lo que las comparaciones entre países se deben realizar con precaución.

Debido a que los datos se recopilan de manera intermitente, pueden ocultar variaciones significativas en el total de recursos hídricos renovables de un año a otro. Los datos tampoco distinguen entre variaciones estacionales y geográficas en la disponibilidad de agua dentro de los países. Los datos para países pequeños y países en zonas áridas y semiáridas son menos confiables que aquellos para países más grandes y países con mayor precipitación.

También se debe tener precaución al comparar los datos sobre extracciones anuales de agua dulce, las cuales están sujetas a variaciones en los métodos de recolección y estimación. Además, los flujos de entrada y salida se estiman en diferentes momentos y en diferentes niveles de calidad y precisión, lo que requiere precaución al interpretar los datos, especialmente para los países con escasez de agua, especialmente en Medio Oriente y África del Norte. Los datos se basan en encuestas y estimaciones proporcionadas por los gobiernos al Programa Conjunto de Monitoreo de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y al Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). Las tasas de cobertura se basan en la información de los usuarios del servicio sobre el uso real del hogar en lugar de en la información de los proveedores de servicios, que pueden incluir sistemas que no funcionan¹².

Además, este indicador es solo una indicación de la eficiencia con que cada país utiliza sus recursos hídricos. Dada la diferente estructura económica de cada país, estos indicadores deben usarse con precaución, teniendo en cuenta las actividades sectoriales de un país y las dotaciones de recursos naturales. Los datos del PIB provienen de archivos de cuentas nacionales del Banco Mundial. La extracción de agua puede exceder el 100 por ciento del total de recursos renovables, donde la extracción de acuíferos no renovables o plantas de desalinización es considerable o cuando la reutilización del agua

¹²<https://datos.bancomundial.org/indicador/ER.GDP.FWTL.M3.KD?end=2014&start=2014&type=shaded&view=map&year=2014>

es significativa. Las extracciones para la agricultura y la industria son totales para riego y producción ganadera y para uso industrial directo (incluso para enfriamiento de plantas termoeléctricas).

– **Productividad hídrica**

Recientemente en el marco de la estrategia Alianza Mundial para la Contabilidad de la Riqueza y la Valoración de los Servicios de los Ecosistemas (WAVES, por sus siglas en inglés), iniciativa promovida por el Banco Mundial quien apoya el desarrollo de la contabilidad ambiental en Colombia y otros países, se inició la elaboración de la Cuenta del Agua a una escala nacional, a partir de la información disponible en las Cuentas Nacionales y la Cuenta Satélite Ambiental del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE y del Estudio Nacional del Agua-ENA, elaborado de manera periódica por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.

En el desarrollo de esta iniciativa se calculó el indicador para Colombia, con datos del 2012. En general, Colombia presentó un indicador bajo en relación con los demás países de América Latina, puesto que mientras el promedio examinado de América Latina y los países de ingreso medio alto producen respectivamente 20,31 y 27,38 dólares por cada m³ de agua, Colombia produce apenas 18,91 dólares. Esta brecha es aún más sorprendente frente a la OCDE que produce 6 veces más riqueza con el mismo m³ de agua (114,44 dólares) (Fedesarrollo, 2016).

En otras palabras, si bien el país cuenta con una importante abundancia de recurso hídrico, ésta no se traduce en un buen aprovechamiento en la producción de riqueza a partir de este recurso. Situación que se refuerza por la disminución de la disponibilidad de agua por persona en un 31% entre 1992 y 2014. Este bajo desempeño debe analizarse principalmente de acuerdo con las ineficiencias en los sectores que más consumen agua. Por ejemplo, mientras el sector agropecuario consumió más de la mitad del total de agua (55%) usada en Colombia (IDEAM, 2015), apenas logró producir 6,16% del PIB (Fedesarrollo, 2016).

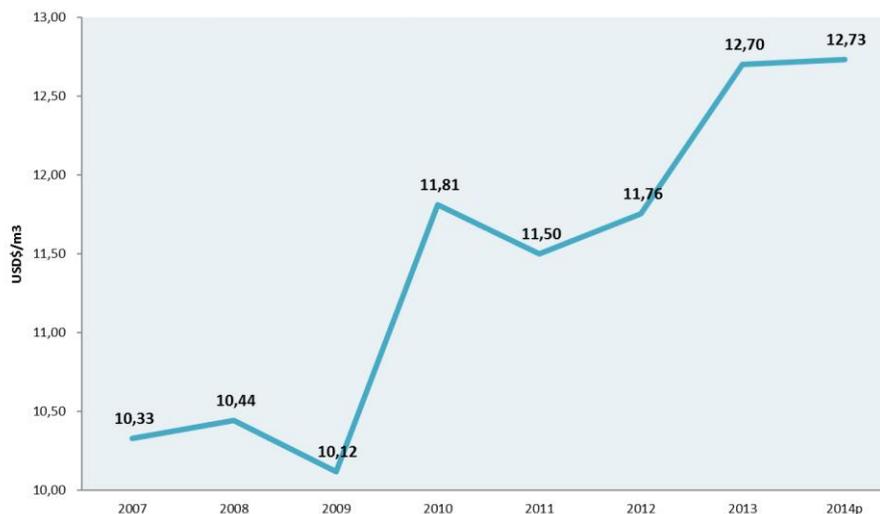


Figura 4. Productividad económica del agua estimada para Colombia desde 2007-2014. Fuente: (Departamento Nacional de Estadísticas, 2016)

Observando el comportamiento del indicador, desde el 2007 al 2014, según estimaciones del DANE (Departamento Nacional de Estadísticas, 2016), se evidencia que la productividad económica del agua se ha venido incrementando desde el 2007 pasando de USD\$10,33/m³ a USD\$12,79/m³ en el 2014. Se evidencia además un aumento importante entre el 2009 y 2010, donde pasa de USD\$10,12/m³ a USD\$11,81/m³ (Figura 4).

Ahora bien, a partir de las variables que componen el análisis del indicador, se evidencia que la extracción ha venido incrementándose sustancialmente desde 2007, pasando de 23.355,2 Millones de m³ a 25.590,3 Millones de m³ en el 2014; mientras que se evidencia que el volumen de agua recibida y suministrada de y para otras unidades económicas, por ejemplo, a través de estrategias de reúso, sigue siendo muy bajo. Lo anterior plantea oportunidades para los sectores económicos, puesto que incrementaría la eficiencia de los procesos productivos e incrementarían la productividad hídrica (Tabla 2).

Respecto a los retornos de agua hacia el medio, se evidencia un aumento pasando de 13.255,5 Millones de m³ en el 2007 a 22.202,8 Millones de m³ en el 2014. Es importante mencionar que más allá del volumen de agua retornado hacia el medio, es necesario identificar el estado de calidad con el cual se retorna. Respecto al valor agregado, se evidencia el incremento sustancial desde el 2007, pasando de 97.952 millones de pesos a 107.269 millones de pesos al 2014. Lo anterior es importante en términos de crecimiento económico a nivel sectorial, sin embargo, es necesario considerar aspectos adicionales al uso del agua, que pueden ser explicativas de estos comportamientos. Asociar la extracción de agua con el valor agregado de las diferentes actividades económicas, implica análisis de factores que pueden tener influencia sobre éste: tecnología, innovación, distribución geográfica, modos de producción, inversiones, además de otras.

Tabla 2. Productividad hídrica 2007-2014

Año	Extracción (Millones de m ³)	Agua recibida de otras unidades económicas (Millones de m ³)	Agua suministrada a otras unidades económicas (Millones de m ³)	Retornos del agua de las unidades económicas al medio ambiente (Millones de m ³)	Valor agregado (Miles de millones de pesos a precios constantes)	Productividad Hídrica (VA/m ³) ¹³
2007	23.355,2	2.742,5	3.680,7	19.255,5	97.952,0	30.983,1
2008	24.286,2	2.710,9	3.657,4	20.202,8	98.259,0	31.324,0
2009	24.751,1	2.685,2	3.429,1	20.842,9	96.061,0	30.357,9
2010	24.338,1	2.444,0	3.333,4	20.692,4	97.680,0	35.438,9
2011	25.659,9	2.456,6	3.017,0	22.163,0	101.302,0	34.497,9
2012	25.480,7	2.448,9	2.977,4	22.047,8	102.434,0	35.268,5
2013	24.854,7	2.321,9	2.930,2	21.482,4	105.340,0	38.110,6
2014	25.590,3	2.333,8	2.913,4	22.202,8	107.269,0	38.202,9

Fuente: DANE, Dirección de Síntesis y Cuentas Nacionales.

Ahora bien, a nivel de ramas de actividad económica, se encontró que aquellas con mayor productividad por m³ fueron: actividades de servicios sociales, comunales y personales 615,8 \$/m³, explotación de minas y canteras 60 \$/m³, industria manufacturera 35,9 \$/m³, en cuanto al sector agropecuario la

¹³ Pesos generados en el valor agregado de las grandes ramas: agricultura, ganadería, silvicultura, caza y pesca; industrias manufactureras y suministro de electricidad, gas y agua; por m³ usado en la economía.

productividad fue de 0,5 \$/m³, y el suministro de electricidad, gas y agua 0,4 \$/m³ (DANE & IDEAM, 2015a).

Sin embargo, recientemente el DANE publicó otros resultados correspondientes a los avances metodológicos alcanzados en la medición realizada para el 2015 de los flujos de agua en unidades físicas, mediante la compilación de cuadros de oferta y utilización para el periodo 2010 – 2015. De esta forma, se observa el comportamiento que presenta la extracción, uso y vertimiento del agua por ramas de actividad económica; con excepción de las pertenecientes a la gran rama de actividad de explotación de minas y canteras(DANE, 2017).

Para el sector agrícola y silvicultura emplearon la metodología de la FAO sobre requerimientos de agua para cultivos, para el sector pecuario utilizaron los módulos de consumo de Fedegan, Fenavi, Porkcolombia, entre otros. Para el sector industrial utilizaron la metodología de retropolación¹⁴ de las encuestas EAI, EAM y SCN. Para el sector de hidroenergía, se tomaron las estadísticas de generación de energía de XM y los parámetros de la capacidad efectiva por tipo de generación. Para el sector servicios y hogares, tuvieron en cuenta la metodología teórica y técnico operativa de la Superintendencia de Servicios Públicos, los principales acueductos, el SUI, las cuentas departamentales, la EAI, la matriz SCN y el censo poblacional.

En la Figura 5 se observa la productividad hídrica para el 2015 provisional es de 3.3 pesos por litro de agua. En la Tabla 3 se puede observar la explicación del comportamiento del indicador. La extracción de agua se incrementa sustancialmente entre el 2010 y el 2015, pasando de 128.340,1 millones de metros cúbicos a 144.174.7 millones de metros cúbicos.

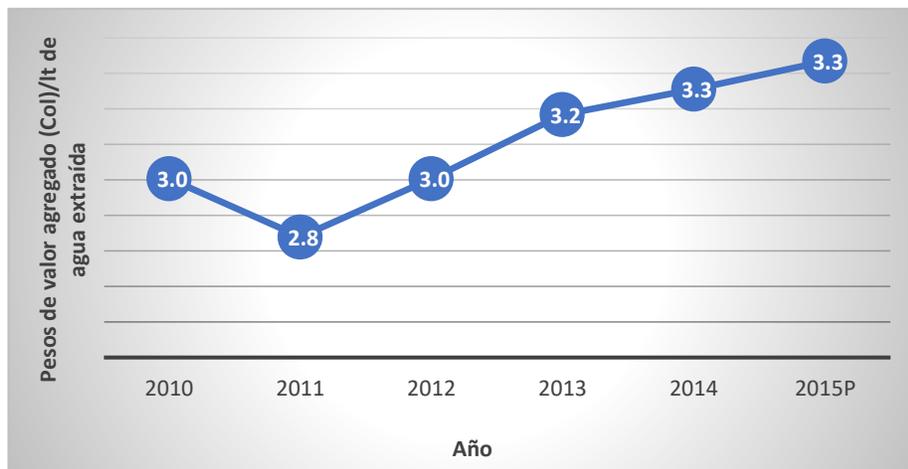


Figura 5. Productividad Hídrica para el periodo 2010 - 2015p

Fuente: DANE, 2017.

¹⁴ Retropolación o empalme: Es un método mediante el cual las variaciones de las tasas de crecimiento de la serie más antigua son aplicadas a los valores de la nueva serie. El proceso de retropolación implica la ejecución de ajustes los cuales son necesarios para que los datos empalmados registren también los cambios atribuibles a modificaciones conceptuales, de clasificación y metodológicas.

Tabla 3. Productividad hídrica 2010-2015p¹⁵

Año	Extracción (hm ¹⁶)	Valor agregado (Miles de millones de pesos a precios constantes)	Productividad Hídrica (VA/lit) ¹⁷
2010	128.340,1	385.503	3,0
2011	144.142,0	409.313	2,8
2012	141.596,0	425.325	3,0
2013	140.224,2	446.395	3,2
2014	142.959,9	465.494	3,3
2015 ^p	144.174,7	480.691	3,3

Fuente: DANE, Dirección de Síntesis y Cuentas Nacionales.

La productividad económica y física puede medirse a nivel sectorial e incrementarse de manera general en dos vías: vía mercado y vía eficiencia. La vía mercado se enfoca principalmente en fomentar la producción económica a través del incremento del PIB y valor agregado sectorial. La vía eficiencia se enfoca principalmente en mejorar la productividad física.

A nivel sectorial, este documento presenta la estimación de productividad económica para el agrícola y minero tomando en cuenta la fórmula del Banco Mundial.

¹⁵ p: Provisional

¹⁶ Mm3: Millones de metros cúbicos / Hectómetros cúbicos

¹⁷ lit: litros

3 PRODUCTIVIDAD SECTORIAL

3.1 PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL SECTOR AGRÍCOLA

A partir de los datos de demanda estimados por departamento, la producción de los cultivos, calculada a partir de los datos de rendimiento de Agronet¹⁸, las áreas reportadas por cultivo en el ENA 2014 y los precios al productor reportados por la FAO¹⁹ (Tabla 4), se calculó la productividad física y económica del agua.

$$PEA = \frac{(\text{Precios}P \times \text{Prodcc})}{Dda\text{Agua}}$$

Donde:

PEA: Productividad del agua económica

PreciosP: Precios al productor

Prodcc: Producción por cultivo

DdaAgua: Demanda de agua por cultivo por departamento

Tabla 4. Precios en pesos por Ton al 2012

Caña de Azúcar	Aceite de Palma Crudo	Plátano	Banano	Mafz	Papa	Arroz
\$ 70.384,80	\$ 1.956.382,10	\$ 879.866,00	\$794.911,70	\$ 737.997,00	\$ 544.132,20	\$ 963.345,00

Fuente: FAO, 2012

Con el fin de obtener una visión global del estado de la productividad del agua física y económica en Colombia, se reporta tanto el promedio de estas variables por cultivo, como la productividad física y económica por departamento. No se reporta el cálculo de la productividad económica del agua para las flores y follajes, ya que no es posible establecer un solo precio para esta categoría de cultivo y la manera en que el ENA 2014 y Agronet reportan la información no permite discriminar la demanda de agua y la producción por tipo de flor.

Con los datos de productividad se llevó a cabo un análisis general de prospectiva en donde, se establece un escenario tendencial de la productividad del agua a partir del comportamiento de las tasas de crecimiento de la producción, las áreas sembradas, el rendimiento de los cultivos y los precios. Se incluyeron otros cultivos como el café, cacao, fríjol, soya y yuca, con el fin de obtener un panorama más general de lo que podría ser la productividad del agua bajo un escenario tendencial a nivel nacional y regional.

En las Figura 6 y Figura 7 se muestran los resultados de la productividad física y económica del agua por cultivo²⁰. En la primera de ellas se muestra el promedio de la producción en toneladas por metro cúbico de agua (ton/m³) mientras que, en la segunda, se mide el promedio del valor de la producción por metro

¹⁸ Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Secretarías de Agricultura Departamentales. Alcaldías Municipales. Base Agrícola EVA 2007-2016.

¹⁹ Fuente: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/PP> Consultado el 18 de septiembre del 2017

²⁰ Ver Anexo sobre productividad económica y física del agua

cúbico del recurso hídrico ($\$/m^3$). Se puede observar como la productividad física y económica del agua tienen comportamientos similares, especialmente en el cultivo del maíz y papa, el cual presenta la mayor productividad económica ($39.458 \$/m^3$) seguido por el cultivo de la papa ($16.046 \$/m^3$). El comportamiento de los cultivos papa y maíz tanto en la productividad económica puede tener explicación en que la demanda de agua para ambos cultivos es baja en relación con los demás cultivos (207 y 221 Millones de metros cúbicos respectivamente). Mientras que, en términos de productividad física, el cultivo de caña de azúcar presenta la mayor productividad con $0.114 \text{ Ton}/m^3$. Este comportamiento se puede explicar en parte porque la producción es mucho mayor respecto a la demanda de agua del cultivo (Según Agronet la producción fue de 40.709.062 para todo el país al 2012, mientras que la demanda en el ENA se estimó en 1.476 millones de metros cúbicos).



Figura 6. Productividad económica del agua promedio por cultivo 2012
Fuente: Elaboración propia



Figura 7. Productividad física del agua promedio por cultivo 2012
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las productividades económicas y físicas por departamento²¹ (Figura 8 y Figura 9). Se observa que Antioquia es el departamento con mayor productividad del agua tanto en términos físicos como económicos, seguido de Tolima, Meta y Boyacá mientras que los demás departamentos se comportan de manera similar, en especial en términos de la productividad física del agua. Llama la atención la productividad tanto física como económica del agua en el departamento de Antioquia, la cual es aproximadamente tres veces la productividad de Tolima, Meta y Boyacá, lo que se debe principalmente a la productividad del cultivo de caña y palma de aceite: la producción es de

²¹ No se incluyen los departamentos de: Amazonas, Caldas, Caquetá, Chocó, Guainía, Guaviare, Putumayo, Risaralda, San Andrés y Providencia, Vaupés y la ciudad de Bogotá, porque presentaban datos inexistentes, insuficientes o atípicos. En la productividad física, además de los anteriores no se incluyeron los departamentos de Atlántico, La Guajira, Magdalena, Sucre y Vichada).

3.295.548 Ton respecto a una demanda de agua de 2.9 millones de metros cúbicos para la caña y de 31.200 Ton respecto a una demanda de 0.80 millones de metros cúbicos.

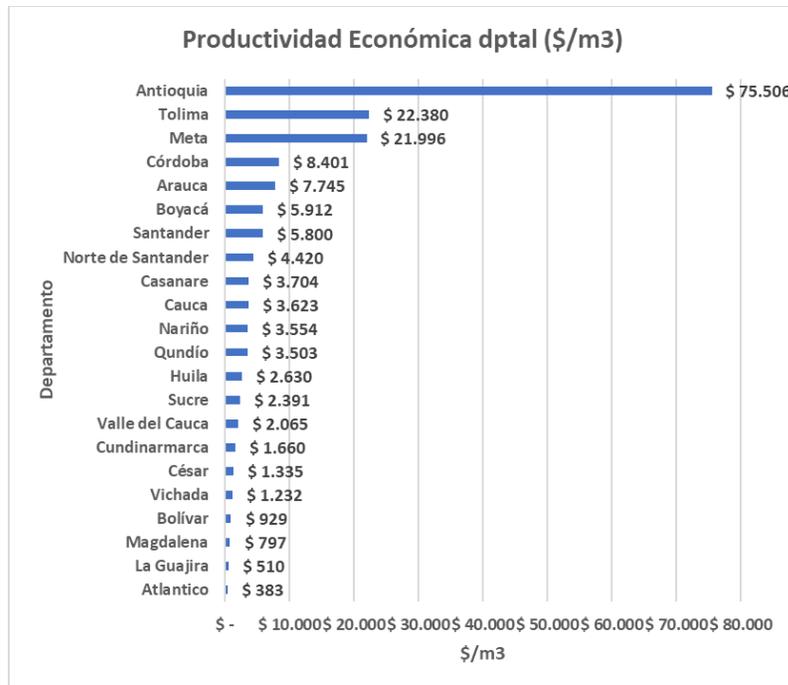


Figura 8. Productividad económica del agua promedio por departamento 2012

Fuente: Elaboración propia

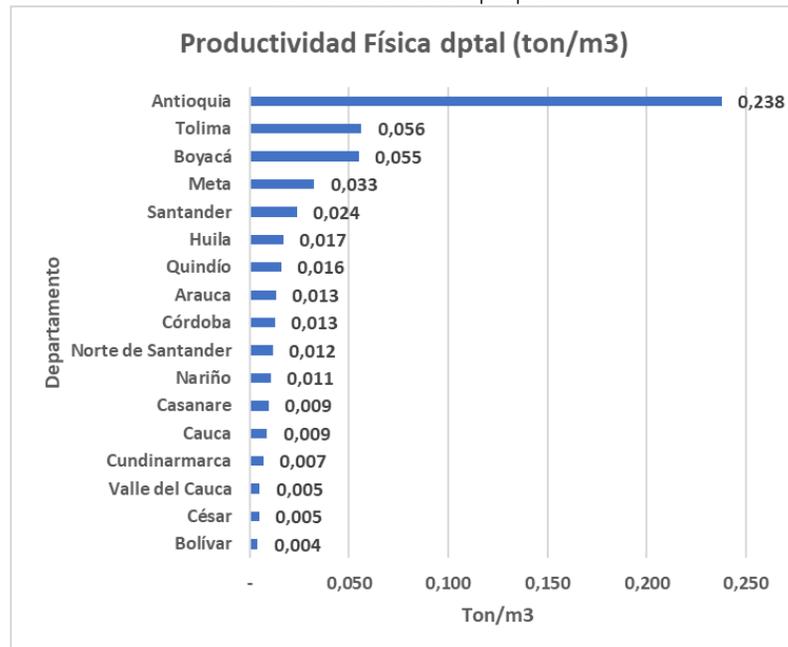


Figura 9. Productividad física del agua promedio por departamento 2012

Fuente: Elaboración propia

Para realizar un análisis prospectivo de la productividad del agua, se tomaron como base las proyecciones de los requerimientos de riego²² de algunos de los principales cultivos según lo reportado por CTA, IDEAM, COSUDE, & GSI-LAC, (2015), en donde se logran identificar las zonas en donde posiblemente se incremente la presión sobre el recurso hídrico. Este análisis tuvo como insumo la revisión de documentos donde se presentan algunas perspectivas gremiales al 2022²³. Las proyecciones gremiales de crecimiento en hectáreas al 2022, buscan un crecimiento en áreas para los cultivos de palma de aceite, maíz, café y caña de azúcar, mientras que para la papa, arroz y fríjol no se identificaron objetivos de área sembrada (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados de las proyecciones gremiales de áreas sembradas para los cultivos analizados

Cultivo	Hectáreas proyectadas	Valor medio ²⁴ de hectáreas
Palma	1.000.000	983.271 ²⁵
	3.000.000	
	647.687	
	743.000	
	636.636	
Cacao	216.141	216.141 ²⁶
Café	464.847	484.791 ²⁷
	505.591	
Caña de azúcar	200.000	447.214 ²⁸
	1.000.000	
Maíz	591.000	591.000 ²⁹
Soya	110.000	110.000 ³⁰
Plátano exportable	45.202	45.202 ³¹
Banano exportable	50.612	50.612 ³²
Yuca	100.000	100.000 ³³

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 5 y de la base de datos de las Evaluaciones agropecuarias municipales (EVA) 2007-2016 de Agronet, se estimó la tasa promedio de crecimiento de las áreas sembradas y de la producción,

²² Huella hídrica azul en la publicación de (CTA et al., 2015)

²³ Apuesta Exportadora Agropecuaria (MinAgricultura); Castiblanco, Carmenza; Etter, Andrés; Mitchell, Aide. (2013) "Oil Palm plantations in Colombia: a model of future expansion". Environmental Science and Policy. No. 27. Pp. 172-183; Plan agrícola para la implementación del programa de biocombustibles, Palmicultura colombiana, Plan Nacional Energético para el 2025, FENALCE, Banco de Iniciativas Regionales para el Desarrollo de Antioquia (2008). "Potencial de Biocombustibles en Antioquia". Febrero del 2008.

²⁴ Se calcula la media geométrica de las metas establecidas por los gremios para cada cultivo

²⁵ Media geométrica de hectáreas meta según: Apuesta Exportadora Agropecuaria (MinAgricultura) (área sembrada-proyección al 2020) con 1.000.000 has; Castiblanco, Carmenza; Etter, Andrés; Mitchell, Aide. (2013) "Oil Palm plantations in Colombia: a model of future expansion". Environmental Science and Policy. No. 27. Pp. 172-183. (Área Sembrada) con 3.000.000 has; Plan agrícola para la implementación del programa de biocombustibles con 743.000 has y La Palmicultura colombiana de cara al 2020 con 636.636 has.

²⁶ Media geométrica de hectáreas meta según Apuesta Exportadora Agropecuaria (MinAgricultura) (área sembrada-proyección al 2020).

²⁷ Media geométrica de hectáreas según Apuesta Exportadora Agropecuaria (MinAgricultura) (área total-proyección al 2020) con 464.847 has y 505.591 has.

²⁸ Media geométrica de hectáreas meta según Apuesta Exportadora Agropecuaria (MinAgricultura) (área total-proyección al 2020) con 200.000 has y Plan Nacional Energético para el 2025 con 1.000.000 has.

²⁹ Meta según FENALCE: http://www.fenalce.org/nueva/plantillas/arch_down_load/PMaizySoya2022.pdf

³⁰ Meta según FENALCE: http://www.fenalce.org/nueva/plantillas/arch_down_load/PMaizySoya2022.pdf

³¹ Meta según Apuesta Exportadora Agropecuaria (MinAgricultura) (área total-proyección al 2020)

³² Meta según Apuesta Exportadora Agropecuaria (MinAgricultura) (área total-proyección al 2020)

³³ Meta según Banco de Iniciativas Regionales para el Desarrollo de Antioquia (2008). "Potencial de Biocombustibles en Antioquia". Febrero del 2008.

con el fin de identificar los cultivos que están experimentando un mayor crecimiento y de verificar el cumplimiento de los objetivos propuestos por los sectores (Tabla 6).

Tabla 6. Tasa de crecimiento promedio por cultivo 2007-2016 y % de cumplimiento de las metas gremiales

Tasa de crecimiento promedio anual EVA 2007-2016			Cumplimiento proyección gremial	
Cultivo	Áreas (Has)	Producción (Ton)	Objetivo (Has)	% cumplimiento ³⁴
Arroz	0,4%	-1,40%		
Banano	1,7%	1,31%	50.612	185% ³⁵
Cacao	4,8%	5,75%	216.141	99%
Café	0,9%	1,00%	484.791	192%
Caña de azúcar	1,1%	2,28%	447.214	110%
Flores y follajes	27,1%	27,25%		
Frijol	-6,0%	-6,08%		
Maíz	-5,6%	-2,63%	591.000	59%
Maíz forrajero	44,3%	59,60%		
Palma de aceite	7,9%	254,06%	983.271	64%
Papa	-4,2%	-2,28%		
Plátano	1,5%	3,13%	45.202	1036% ³⁶
Soya	5,6%	7,61%	110.000	27%
Yuca	1,4%	2,70%		

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Agronet

Según la Tabla 6 los cultivos que están experimentando un mayor crecimiento tanto en áreas sembradas como en producción son el maíz forrajero (44% y 59% respectivamente), las flores y follajes (27,1% y 27,5%) y la palma de aceite (7,9% y 254,06%).

La tasa de crecimiento de la palma de aceite, que sobrepasa el 100% obedece a un crecimiento exagerado entre la producción del 2015 al 2016; cuando pasa de 1.516.719 ton a 35.078.801 ton, principalmente por la producción reportada por Zona Bananera en el Magdalena con 33.636.240 ton. Sin embargo, se observa que aún no se ha cumplido la meta de área del gremio, es decir que se espera una mayor expansión del cultivo. Esta situación llama la atención sobre el crecimiento expansionista de este cultivo ya que su demanda de agua es una de las más altas (1.794 millones de metros cúbicos, es el cultivo priorizado con mayor demanda). Por otra parte, cultivos como la soya y el maíz, se encuentran alejados de la meta propuesta, reflejando inconvenientes para lograr los objetivos propuestos, ya sea porque es más beneficioso para el sector importar la producción o porque el mercado interno ha descendido la demanda.

Productos como el plátano, banano, cacao y caña de azúcar que hacen parte de la canasta exportadora de Colombia (Guzman & Ospina, 2016), no experimentan tasas de crecimiento altas de las áreas sembradas mientras que, productos como la papa, el frijol y el maíz, que son básicos en la canasta familiar, experimentan tasas de crecimiento negativas tanto para las áreas sembradas como para la producción, lo que permite deducir que al menos en un escenario de corto plazo, estos cultivos tenderán

³⁴ Los porcentajes superiores al 100% obedecen a que se superó la meta establecida por los gremios.

³⁵ Las bases de datos del EVA de Agronet no permiten distinguir entre banano para consumo interno y banano para exportación lo que genera que esta cifra esté sobre estimada.

³⁶ Las bases de datos del EVA de Agronet no permiten distinguir entre plátano para consumo interno y plátano para exportación lo que genera que esta cifra esté sobre estimada.

a disminuir la producción y por ende la demanda de agua en las regiones en donde se cultiva. La Tabla 6, muestra cómo las metas propuestas por los gremios se cumplieron para la caña, el café, el cacao, el banano y el plátano, lo que refuerza el dinamismo de estos productos dentro de la economía agrícola colombiana.

El análisis de las tasas de crecimiento de rendimiento de los cultivos es un insumo para la definición del escenario tendencial de la productividad del agua, ya que permite observar cómo se ha comportado el rendimiento de los productos agrícolas, lo cual es de gran relevancia en la productividad del agua y en los incentivos económicos que se pueden desarrollar para promover la producción.

Permite de cierta forma observar el posible comportamiento de la productividad del agua a mediano y largo plazo, porque, bajo un escenario donde el agua demandada por hectárea es fija (considerando que los requerimientos físicos de las plantas son constantes dadas unas condiciones climáticas y geográficas), una disminución en el rendimiento implicaría que cada vez se necesitarían más hectáreas para mantener al menos la producción constante, trayendo como consecuencia una expansión de las hectáreas sembradas y por lo tanto de la demanda de agua, lo que disminuiría la productividad de la misma.

Lo anterior indica que cultivos como el cacao, café, caña, maíz, palma de aceite, plátano y soya han venido aumentando su productividad, implicando que, si su consumo aumentase en el futuro, la productividad del agua estaría también en aumento. En la Tabla 7 se presenta la evolución promedio a nivel nacional del rendimiento de los cultivos, en donde se confirma que estos cultivos en promedio han aumentado su rendimiento, resaltando el caso de la palma, que en 2016, tuvo un incremento en el rendimiento del 818% pasando de 3,11 ton/ha a 28,65 ton/ha lo que causó que en promedio, la tasa de crecimiento del rendimiento en los últimos nueve años fuese del 90,26%³⁷.

Tabla 7. Tasa de crecimiento del rendimiento de los cultivos entre los años 2007-2016

Cultivo	Tasa de crecimiento del rendimiento del cultivo	Cultivo	Tasa de crecimiento del rendimiento del cultivo
Arroz	-0,91%	Maíz	0,71%
Banano	-0,36%	Maíz forrajero	-6,49%
Cacao	1,27%	Palma de aceite	90,26%
Café	2,41%	Papa	-0,35%
Caña	1,23%	Plátano	0,65%
Flores y follajes	-2,97%	Soya	1,19%
Frijol	-0,52%	Yuca	-0,16%

Fuente: Agronet

Se podría esperar que, en el mediano plazo, los cultivos con tasas de crecimiento de rendimiento positivas (Tabla 7) sean los que tienen mayor probabilidad de aumentar su productividad del agua. Adicionalmente, algunos de ellos cuentan con importantes incentivos económicos por parte del Gobierno (zonas francas permanentes especiales, reducción sobre el impuesto de la renta para actividades de aprovechamiento de nuevos cultivos de tardío rendimiento en cacao, caucho, palma de aceite, cítricos y frutales; producción de etanol y biodiesel en los insumos agrícolas con la más alta eficiencia energética del mercado: caña de azúcar y palma de aceite, entre otras), y por tanto, se espera que tengan una mayor expansión bajo un escenario tendencial.

³⁷ Este comportamiento lo causó el aumento en la producción en el departamento de Magdalena.

Para complementar el análisis, se llevó a cabo una priorización de los departamentos por cultivo utilizando los datos de área sembrada³⁸, seleccionando los departamentos que tenían una mayor proporción de las áreas sembradas para cada uno de los cultivos (Tabla 8).

Tabla 8. Tasa de crecimiento promedio de la producción, áreas sembradas y rendimiento por cultivo y departamento en el periodo 2006 - 2016

Cultivo	Departamento	Porcentaje de participación en la producción del cultivo (%)	Tasa de crecimiento promedio de la producción (%)	Tasa de crecimiento promedio de las áreas sembradas (%)	Tasa de crecimiento promedio del rendimiento (%)**
Arroz	Casanare	31,9%	39,63%	43,87%	-0,49%
	Meta	14,5%	45,04%	46,83%	-0,18%
	Tolima	11,5%	7,62%	7,31%	-0,13%
Banano	Antioquia	41,5%	1,23%	1,45%	-1,24%
	Magdalena	13,3%	-1,00%	-0,25%	-0,13%
	Valle del cauca	7,8%	7,41%	1,36%	2,71%
Cacao	Antioquia	9,9%	15,48%	7,57%	3,38%
	Arauca	8,2%	3,13%	4,23%	-0,91%
	Nariño	12,0%	30,74%	13,08%	9,22%
	Santander	23,7%	0,68%	0,87%	-0,37%
Café	Antioquia	13,6%	0,59%	0,16%	1,84%
	Caldas	7,6%	-2,49%	-2,42%	0,72%
	Cauca	10,0%	6,38%	3,66%	3,46%
	Huila	16,3%	3,29%	5,30%	-1,26%
	Quindío	2,8%	-0,36%	1,66%	-0,17%
	Risaralda	5,4%	-2,73%	-1,14%	-0,74%
	Tolima	12,7%	2,82%	1,63%	1,71%
Caña de azúcar	Cauca	12,2%	2,95%	0,77%	2,36%
	Valle del cauca	39,3%	1,89%	1,93%	0,98%
Fríjol	Antioquia	11%	-1,65%	-3,45%	0,11%
	Huila	18%	0,90%	3,64%	-1,23%
	Nariño	13%	7,53%	5,23%	2,44%
	Tolima	14%	20,51%	17,37%	-1,12%
Maíz	Bolívar	12%	4,99%	3,41%	0,24%
	Córdoba	14%	24,29%	18,81%	0,21%
Maíz forrajero*	Caldas	17%	-19,67%	-1,05%	-13,65%
	Meta	60%	-8,73%	12,12%	-16,92%
Palma de aceite	Casanare	13%	19,81%	22,42%	-1,85%
	Cesar	12%	6,26%	7,95%	-2,47%
	Meta	37%	11,83%	9,43%	0,10%
	Santander	14%	4,27%	5,18%	-3,31%
Papa	Boyacá	28%	9,64%	9,13%	-0,62%
	Cundinamarca	35%	7,38%	4,88%	1,02%
	Nariño	22%	7,98%	9,22%	-2,04%
Plátano	Antioquia	14%	4,47%	1,05%	1,48%
	Córdoba	7%	4,49%	3,28%	-0,03%
	Valle del cauca	7%	8,91%	6,97%	0,30%

³⁸ <http://www.agronet.gov.co/> Consultado el 14 de septiembre de 2017.

Cultivo	Departamento	Porcentaje de participación en la producción del cultivo (%)	Tasa de crecimiento promedio de la producción (%)	Tasa de crecimiento promedio de las áreas sembradas (%)	Tasa de crecimiento promedio del rendimiento (%)**
Soya	Meta	35%	0,95%	-1,83%	4,97%
	Vichada*	59%	60,73%	65,52%	3,27%
Yuca	Bolívar	20%	5,18%	3,61%	-0,28%
	Córdoba	13%	5,96%	5,79%	-0,28%
	Magdalena	9%	7,25%	2,39%	-0,22%
	Sucre	8%	4,57%	0,61%	2,17%

* Debido a la disponibilidad de los datos solo se tomó el promedio del periodo 2013-2016

** El verde representa posibles aumentos de la productividad en los próximos años, dado el comportamiento de la tasa de crecimiento promedio del rendimiento. El rojo representa posibles disminuciones en esta variable.

Fuente: Elaboración propia

Bajo un escenario tendencial, el cultivo del **arroz** tendería a expandirse en los llanos orientales, en especial en los departamentos del Casanare y Meta que representan alrededor del 46% de las áreas sembradas de arroz del país. Esta expansión podría aumentar la presión sobre los recursos suelo y agua; a menos que el sector desarrolle prácticas, técnicas, tecnologías que aumenten la eficiencia en el riego y en el uso del suelo.

Para el cultivo del **banano**, los datos muestran que aproximadamente el 54% de las áreas sembradas se encuentran en los departamentos de Antioquia y Magdalena, mientras que un 8% se encuentra en el Valle del Cauca. Es de esperar que, bajo un escenario tendencial, se produzca un aumento de las áreas del cultivo de banano en el Valle de Cauca que vendrían acompañadas con aumento en el rendimiento. El comportamiento del Magdalena puede asociarse a un posible reemplazo de cultivos: cambio de banano por palma de aceite; siendo el banano un cultivo para el mercado doméstico e internacional y la palma de aceite, básicamente para producción de biocombustibles.

Para el **cacao** se espera expansión de las áreas sembradas en Antioquia y Nariño ya que tienen tasas de crecimiento en hectáreas de 7,5% y 13,08% respectivamente. Para el **café**, se espera que en Caldas y Risaralda se presente un decrecimiento en las áreas sembradas y por lo tanto que experimenten disminuciones en la productividad del agua.

Para la **caña de azúcar**, se observa que la mayor parte de la producción se encuentra en el Valle del Cauca (39%) y Cauca (12,2%), en donde las tasas de crecimiento son positivas tanto en áreas sembradas, producción y rendimientos. Lo anterior implica que, bajo un escenario tendencial, podrían observarse aumentos en la productividad del agua, siempre y cuando se implementen estrategias para mejorar las eficiencias en el uso del agua. Para el cultivo de **frijol**, la mayor parte de la producción está concentrada en Huila, Tolima, Nariño y Antioquia, las cuales concentran el 56% de la producción nacional. Bajo un escenario tendencial, se puede esperar que exista un crecimiento en tanto en áreas como en producción en el Tolima, pero un decrecimiento en la tasa del rendimiento. Lo anterior indica que es necesario tomar medidas para mejorar el rendimiento y aumentar la productividad.

Para el **maíz** y el **maíz forrajero**, se muestra un patrón de comportamiento en donde el primero viene expandiéndose en el Bolívar y Córdoba, mientras que el segundo viene experimentando fuertes crecimientos en Meta con tasas promedio de crecimiento de las áreas sembradas del 12% anual.

Para la **palma de aceite**, se observa que las principales zonas de producción se encuentran en la región de los llanos orientales, especialmente en Meta (37%) y Casanare (13%), en César (12%) y Santander (14%). Bajo un escenario tendencial, la expansión del cultivo estaría jalonado por los fuertes incentivos económicos y preferencias arancelarias en tratados comerciales (Guzman & Ospina, 2016) así como por ser considerado un cultivo estratégico para suplir la demanda de energía del país (UPME, 2007).

Para la **papa**, se identificó que el 85% de la producción se concentran en Cundinamarca (35%), Boyacá (28%) y Nariño (22%). Adicionalmente, la Tabla 8 muestra que las tasas de crecimiento promedio en la producción vienen creciendo entre el 7% y el 9% en los tres departamentos. A pesar de esto, se identificó que, en los departamentos de Boyacá y Nariño, las tasas de crecimiento promedio del rendimiento son negativas lo que implicaría, bajo un escenario tendencial, que para estos departamentos la productividad del agua, tendería a decrecer, mientras que en el departamento de Cundinamarca se incrementaría.

Para el **plátano** se identificó que la producción se concentra principalmente en Antioquia, Córdoba y Valle del Cauca. Además, se han observado en los últimos nueve años, tasas de crecimiento de las áreas sembradas entre el 1% y el 7% en promedio. Sumado a lo anterior, las tasas de crecimiento promedio del rendimiento muestran que ha venido aumentando en Antioquia y Valle del Cauca, mientras que en Córdoba ha sido ligeramente negativa.

Para la **soya** se identificó que la producción se concentra principalmente en Vichada, con tasas de crecimiento de la producción del 60.73% y de las áreas sembradas del 65.52%. Es importante aclarar que esta tasa de crecimiento puede deberse a que este cultivo se encuentra en una fase de expansión inicial y en este sentido pasar de 705 hectáreas a 5.650³⁹ representa un cambio porcentual más alto que pasar por ejemplo de 17.135 hectáreas a 22.228⁴⁰. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede observar también como, para Vichada y Meta, la tasa de crecimiento del rendimiento del cultivo ha venido aumentado: 4,97% para Meta y 3,27% para Vichada lo cual, bajo un escenario tendencial, implicaría aumentos en la productividad del agua.

Para la **yuca**, a pesar de que en todos los departamentos las tasas de crecimiento son positivas; los rendimientos vienen disminuyendo a excepción del departamento de Sucre, lo cual implica que, bajo un escenario tendencial, en donde las áreas crecen, pero su rendimiento disminuye, se esperaría una reducción en la productividad del agua.

El análisis de productividad del agua se evaluó a partir de las tasas de crecimiento promedio de los precios de los cultivos agrícolas, el cual se considera como un escenario tendencial. En la Figura 10 se muestran estas tasas, calculadas a partir de la base de datos de la FAO entre los años 2006-2015.

Bajo un escenario tendencial, se puede esperar un incremento en la productividad económica del agua para todos los cultivos. Sin embargo, sobresalen los cultivos de frijol, yuca, plátano, banano y papa, cuyas tasas de incremento de los precios en promedio se encuentran sobre el 8% mientras que los precios de la caña de azúcar vienen incrementándose a razón de un 4% promedio anual y el maíz lo hace a un 6% promedio anual. De esta manera, se puede esperar que, si bien la productividad económica del agua de los cultivos podría aumentar, al menos en el corto y mediano plazo, los cultivos como la caña de azúcar

³⁹ Cambio en áreas sembradas para el departamento de Vichada entre los años 2011 y 2012.

⁴⁰ Cambio en áreas sembradas para el departamento de Meta entre los años 2012 y 2013

y el maíz lo harán de manera más lenta, lo que sin duda hará que queden rezagados en cuanto a productividad del agua frente a los demás.

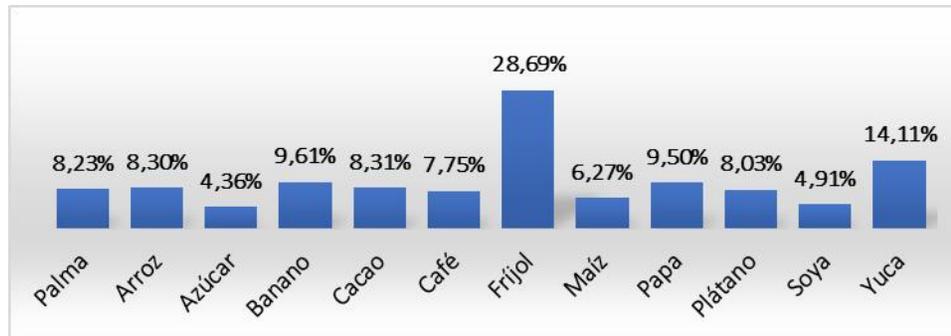


Figura 10. Tasa de crecimiento promedio de los precios de los productos agrícolas.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de FAO

Apoyando este análisis tendencial, a partir de los resultados obtenidos en el ENA 2014 (CTA et al., (2015)) se proyecta que para el 2022 el requerimiento de riego de la **caña de azúcar** aumente en el centro del país, en especial en la cuenca del río Cauca. En el caso de la **palma de aceite** se espera un aumento de este requerimiento en la región de los llanos orientales, en especial en el norte del Meta y el centro y sur del Casanare, así mismo en el occidente antioqueño, al oriente del Norte de Santander y en Sucre y Magdalena. Para los cultivos de **plátano y flores y follajes**, si bien se esperan aumentos en el requerimiento hídrico, estos no son significativos, concentrándose especialmente en la región occidental de Antioquia, la zona oriental de Santander y la región sur de Sucre. Finalmente, para el cultivo de **cacao**, al 2022 se espera un aumento significativo del requerimiento a lo largo de la cuenca del río Magdalena, en el norte del Casanare, Arauca, Norte de Santander, Sucre y la región del Urabá antioqueño.

De esta manera se puede considerar que en **las regiones en donde se espera una mayor presión sobre el recurso hídrico son las del Centro y Oriente del país, en especial sobre la cuenca del río Magdalena y los departamentos de Casanare, Meta y Norte de Santander, lo que hace más vulnerables los incrementos en la productividad del agua en estas zonas.** Adicionalmente, a partir del análisis anterior, se muestra cómo los cultivos de caña de azúcar y palma de aceite son los que se esperan que ejerzan una mayor presión sobre el recurso hídrico y tengan una mayor probabilidad de reducción de la productividad de agua.

3.2 PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL SECTOR MINERO

Tomando como base los conceptos de eficiencia y productividad del agua definidos, en el sector minero se aplicó el indicador de Intensidad en el Uso del Agua (m^3 de agua usada/mineral procesado) propuesto en (Ministerio de Minas, 2015; The Stakeholder Accord on Water Conservation, 2009). Adicionalmente, la eficiencia y la productividad también pueden ser medidas en función del agua consumida⁴¹ y el mineral procesado (Department of Water and Sanitation & Africa, 2014). Para efectos de este análisis se estima la eficiencia y productividad en el uso del agua tomando como referencia el esquema de uso de agua para el sector industrial (Figura 39) y los siguientes indicadores (Ecuación 3, Ecuación 4, Ecuación 5 y Ecuación 6):

⁴¹ Es equivalente a la Huella Hídrica Azul definido en el capítulo 2, aplicado por la UPME a la minería de oro y carbón (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2016).

Ecuación 3. Intensidad en el Uso del Agua

$$Eficiencia1 = \frac{Volumen\ total\ total\ de\ agua\ m^3 - litros}{Cantidad\ de\ mineral\ obtenido\ (kg - tonelada)}$$

Ecuación 4. Eficiencia en el consumo de agua

$$Eficiencia2 = \frac{Consumo\ total\ de\ agua\ m^3 - litros}{Cantidad\ de\ mineral\ obtenido\ (kg - tonelada)}$$

Ecuación 5. Productividad física asociada al agua usada

$$Productividad\ 1 = \frac{Cantidad\ de\ mineral\ obtenido\ (kg - tonelada)}{Volumen\ total\ de\ agua\ m^3 - litros}$$

Ecuación 6. Productividad física asociada al agua consumida

$$Productividad\ 2 = \frac{Cantidad\ de\ mineral\ obtenido\ (kg - tonelada)}{Consumo\ total\ de\ agua\ m^3 - litros}$$

De acuerdo con la información disponible sobre producción (oro y carbón) y uso del agua, se estimó la eficiencia (Tabla 9) a partir de la Ecuación 3 y Ecuación 4 y la productividad (Tabla 10) con la Ecuación 5 y Ecuación 6.

Tabla 9. Estimación de la eficiencia en el uso del agua

Minería de oro			Minería de carbón		
Departamento	Eficiencia 1 m ³ /Kg	Eficiencia 2 m ³ / Kg	Departamento	Eficiencia 1 m ³ /Ton	Eficiencia 2 m ³ /Ton
Bolívar	1.614,5	1.169,1	Antioquia	0,4	
Caldas	3.102,8	1.044,9	Boyacá	0,6	
Cauca	1.776,5	610,4	Cundinamarca	1,6	0,4
Chocó	99.281,8				

Fuente: elaboración propia a partir de (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2015c, 2016)

Tabla 10. Estimación de la productividad del agua

Minería de oro			Minería de carbón		
Departamento	Productividad 1 (Kg/m ³)	Productividad 2 (Kg/m ³)	Departamento	Productividad 1 (Ton/ m ³)	Productividad 2 (Ton/ m ³)
Bolívar	0,0015	0,001	Antioquia	8,6	
Caldas	0,0006	0,007	Boyacá	19,0	
Cauca	0,0012	0,007	Cundinamarca	11,6	5,6
Chocó	0,00001				

Fuente: Elaboración propia a partir de (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2015c, 2016)

En la Tabla 9 y Tabla 10 se observa, que **no se reportan datos para los dos principales departamentos productores de oro y carbón** (Antioquia y Cesar respectivamente), esto condiciona cualquier análisis hídrico que se realice para estos minerales, ya que **no se cuenta con información confiable para más del 40% de la producción de ambos minerales** (Tabla 51). Adicionalmente, la base de datos para realizar las estimaciones parte de un total de 58 minas, las cuales no son una muestra estadísticamente representativa de los distritos mineros. Estos resultados **evidencian un desconocimiento sobre las variables que inciden en la eficiencia y productividad** tales como uso de agua, producción de acuerdo con la escala (pequeña, mediana y gran minería) y las tecnologías y métodos empleados. Este desconocimiento de la información se debe principalmente a que **la actividad minera es tan diversa y extensa en el territorio, que desborda toda la capacidad técnica, operativa e institucional en todos los**

niveles territoriales⁴². Esta situación también identificada en la encuesta DELPHI, dificulta el proceso de control y en consecuencia no se tiene un seguimiento permanente a las variables que pueden incidir en la eficiencia, productividad del agua y en los vertimientos. Estas limitantes de información traen como consecuencia los siguientes aspectos:

- **Estimación de la cantidad de agua total usada en la minería de oro y carbón:** según el ENA 2014 (IDEAM, 2015a), el oro y el carbón, representa el 1,8% de la demanda hídrica total, sin embargo, **la base de información puede subestimar la demanda real de agua**, por lo tanto, este sector puede tener una mayor participación en el consolidado nacional y a nivel de SZH tener mayor incidencia en indicadores como el IUA, el IARC o el IACAL.
- **Desconocimiento del indicador de eficiencia y productividad:** la información disponible **no permite generar una línea base confiable para diferentes años**, que permita estimar la eficiencia y productividad del sector, y a su vez establecer metas que indiquen mejoras en los procesos. En el documento (ICMM, 2017) se propone un formato para registrar la información hídrica en empresas mineras.
- **Datos de eficiencia para diferentes características del sector:** no se tiene cuantificada la eficiencia y productividad del agua que relacione el mineral explotado, la escala de producción y las técnicas empleadas, **de esta manera se dificulta la definición de metas para mejorar la eficiencia y productividad en el sector.**
- **Dificultad para comparar con datos internacionales:** originalmente las ecuaciones propuestas para estimar la eficiencia consideran en el denominador la cantidad de material extraído y no la cantidad de mineral obtenido, sin embargo, en la base de datos del Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO) se reporta es la producción. Por tal motivo, **no es posible comparar los resultados con las eficiencias y productividades obtenidas en otros países** (Department of Water and Sanitation & Africa, 2014).
- **Información limitada sobre las condiciones de los sistemas hídricos superficiales y subterráneos⁴³:** no se cuenta con las herramientas suficientes que permiten tomar mejores decisiones en cuanto al uso del agua, las actividades que se pueden desarrollar en un territorio y **el impacto que dichas actividades pueden generar en el mismo específicamente en los sistemas hídricos.**

En general para el sector, los avances en el indicador de productividad económica han sido escasos. La información se concentra especialmente en la relación cantidad de material extraído y uso del agua. Sin embargo, para Colombia se realizaron estimaciones de la productividad económica de oro en los departamentos de Bolívar, Cauca y Caldas y de carbón en los departamentos de Antioquia, Boyacá y Cundinamarca, en donde a partir de la información registrada para algunas minas se logró estimar la demanda de agua (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2015c, 2016), la cual fue extrapolada al departamento en donde estaban ubicadas utilizando los datos de producción municipal del SIMCO del 2012.

⁴² En el estudio (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2015), se realizó un análisis de la capacidad operativa, técnica y financiera de las CAR, donde se resalta las dificultades que tienen las CAR para gestionar adecuadamente los recursos naturales

⁴³ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en el Taller comité consultivo 1 diagnóstico y priorización

Para el cálculo de la productividad económica, se tomó el precio promedio del gramo de oro reportado para el año 2012 por el Banco de la República (\$88.624 por gramo) mientras que, para el carbón, se tomó el precio promedio de la tonelada de carbón a boca de mina establecido por la UPME en el Decreto 0309 del 2012 (\$79.701 por tonelada). Si bien se tienen datos del SIMCO sobre la producción de oro y carbón a nivel departamental, debido a que solo se ha realizado una estimación muy puntual de la demanda de oro y carbón para Colombia resulta insuficiente la información para realizar un escenario tendencial de la productividad del agua.

En la Tabla 11 y Tabla 12 se muestra como **la productividad económica es mayor para el carbón en comparación con la del oro**. Sin embargo, al analizar cada producto minero por separado, se observa que la mayor productividad económica del oro se encuentra en Bolívar, mientras que la productividad más baja se registró en Chocó, donde alcanzó una productividad de 892,7 \$/m³.

Tabla 11. Productividad económica del oro

Departamento	Producción 2012 (gr)	Demanda de agua 2012 (m ³)	Productividad económica del Agua (\$/m ³)
Bolívar	4.124.651,9	6.659.250,6	\$54.895,3
Caldas	1.753.228,8	5.439.918,2	\$28.564,0
Cauca	31.66.920,6	5.626.034,5	\$49.889,4
Chocó	24.438.013,8	2.426.249.995,0	\$892,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Productividad económica del carbón

Departamento	Producción 2012 (Ton)	Demanda de agua 2012 (m ³)	Productividad económica del Agua (\$/m ³)
Antioquia	155.276,8	60.557,9	\$204.361,5
Boyacá	2.625.246,5	1.556.771,2	\$134.403,0
Cundinamarca	1.700.301,3	2.734.084,5	\$49.565,3

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, para el carbón, se observa que **Cundinamarca presenta una productividad económica mucho menor a la calculada para los otros departamentos**, lo cual haría necesario conocer más a detalle el tipo de producción en este departamento.

4 SECTOR AGRÍCOLA

Colombia cuenta con 8.577.010 hectáreas sembradas entre cultivos permanentes, transitorios, forrajeros y plantaciones forestales, distribuidos en grandes grupos de cultivos como se muestra en la Figura 11 (DANE, 2016). Según el ENA 2014, el sector agrícola cuenta con 41 cultivos, 21 permanentes, 18 transitorios y dos categorías de pastos (corte y forraje), las cuales son cultivadas para el consumo del ganado. En ese estudio, se estima la huella hídrica azul o el requerimiento de riego para el total de área sembrada en 6.942,4 millones de metros cúbicos, de los cuales el 56% corresponde a cultivos permanentes, el 12% a transitorios y el 31% a los pastos.

Partiendo de esta información y de los 41 cultivos del ENA 2014, se realizó una priorización con el fin de identificar los cultivos que mayor influyen el recurso hídrico en Colombia, teniendo en cuenta los criterios que se describen en la Tabla 13, y como resultado, se priorizaron los cultivos de: arroz, maíz, flores, banano, palma de aceite, papa, plátano, caña de azúcar, pastos de corte y pastos de forraje⁴⁴.

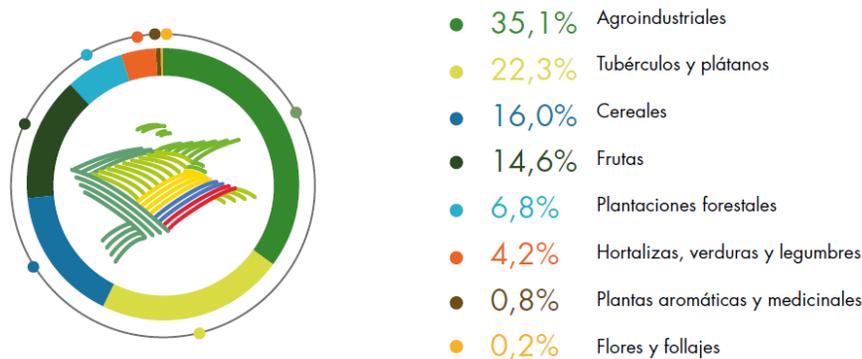


Figura 11. Participación de los grandes grupos de cultivos en el área total sembrada en Colombia

Fuente: (DANE, 2016)

Tabla 13. Algunos datos asociados a los cultivos priorizados en Colombia

Criterio	Observación
Requerimiento de riego ⁴⁵	El 84% del agua de riego en el país es usada por los cultivos priorizados, siendo los pastos de corte los grandes consumidores hídricos. Para este tipo de pastos, se estimó un requerimiento de riego de 1.744,8 millones de m ³ , seguido de los cultivos permanentes de palma de aceite (975,7 millones de m ³), plátano (938,3 millones de m ³) y caña de azúcar (774,9 millones de m ³), mientras que el arroz de riego, corresponde al cultivo transitorio con mayor uso de agua con 444,5 millones de m ³ de requerimiento de riego (IDEAM, 2015a)
Rentabilidad económica y empleo	Cultivos como la palma de aceite, el banano y la caña de azúcar han sido jalonados por el mercado internacional, y además logran cubrir gran parte de la demanda a nivel interno. Los pastos, están asociados a la actividad ganadera la cual corresponde al 21% del Producto Interno Bruto (PIB) total agropecuario. Por su parte, el arroz es reconocido por su importancia económica a escala mundial; en Colombia genera alrededor de 500 mil empleos directos e indirectos (Fedearroz, 2014). Por otro lado, casi las tres cuartas partes de la producción total de maíz provienen de unidades familiares campesinas, la mayoría de

⁴⁴ Es de aclarar, que, si bien el cultivo de café es uno de los más importantes en las exportaciones y generación de empleo del país, no fue priorizado debido a que en general se realiza en seco, es decir no emplea agua de riego.

⁴⁵ Los valores de requerimiento de riego estimados en el ENA 2014 para los principales cultivos, se pueden observar en la Tabla 6.

Criterio	Observación
	ellas de economías de subsistencia. Finalmente, la producción de flores en Colombia, se ha incrementado en un 11% en los últimos cuatro años, siendo un cultivo importante en la generación de empleo formal. A noviembre de 2016, Colombia exportó más de 225.000 toneladas de flores que representan más de 1.100 millones de dólares en ventas ⁴⁶ .
Mercados internacionales – Agua Virtual	Aceite de palma, azúcar, banano, plátano y flores son algunos de los principales productos de exportación de Colombia. La dinámica de estos en el mercado internacional influencia la presión sobre el recurso hídrico en el país. Según el ENA 2014, el flujo total de agua virtual en el año 2012 fue de 11.182 millones de metros cúbicos, de los cuales el 11% corresponde al azúcar, el 9% al aceite de palma, el 6% al banano, el 6% al plátano y el 1% a las flores (IDEAM, 2015a).
Presión territorial	Los cultivos priorizados representan gran parte del territorio nacional. Según el Censo Nacional Agropecuario (DANE, 2016), la palma de aceite con el 16% del área total de los cultivos agroindustriales es uno de los cultivos con mayor área sembrada en Colombia, al igual que la caña de azúcar que aporta el 8%. El plátano es el más representativo en su clase (tubérculos y plátanos) con el 47,9% y la papa representa un 11,2%. Por su parte, el maíz ocupa el 53% del área sembrada en cereales, seguido del arroz con el 37,6%. Según el ENA 2014 el área en pastos de corte y forraje asciende a 1.815.830,2 ha (IDEAM, 2015a).

Fuente: Elaboración propia

4.1 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD

Mundialmente, el sector agrícola es reconocido como uno de los principales consumidores hídricos (Bastiaanssen et al., 2014), a nivel global el 85% del consumo de agua dulce se concentra en este sector (Mekonnen & Hoekstra, 2011; Zeng et al., 2012), siendo la agricultura con riego el 19% del total del área cultivada a escala mundial (CEPAL & DNP, 2014).

Según IDEAM (2015) el requerimiento hídrico del sector agrícola en Colombia es de 61.857,37 millones de metros cúbicos, de los cuales el 89% es suplido por agua verde que es el agua proveniente de la precipitación que las plantas toman del suelo y el 11% restante corresponde a agua azul o requerimiento de riego (6.942,4 millones de metros cúbicos). La demanda de agua estimada corresponde al requerimiento de riego más las pérdidas; y es de 16.760,3 millones de metros cúbicos (46,6% de la demanda total nacional). El volumen de agua estimado en la demanda incluye no solo el agua que es tomada y aprovechada por el cultivo para compensar la pérdida por evapotranspiración, sino también a las pérdidas en el sistema de riego. El volumen de agua verde no es considerado en los cálculos de eficiencia y productividad porque toda la que es tomada por las plantas se utiliza, es decir que no sufre pérdidas.

Por su parte, la Cuenta del Agua, estima que para el sector económico “Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca”, el volumen de agua extraída es de 73.712 millones de m³, con un 74% correspondiente a agua verde y 26% a agua azul, de los cuales 502 millones de m³ provienen de fuentes subterráneas y 18.295 millones de m³ de fuentes superficiales (DANE & IDEAM, 2015b). Adicionalmente, podría considerarse como volumen de agua de entrada otras fuentes adicionales como el agua de reúso (numeral 4.3) o de recirculación, haciendo referencia al agua residual generada en el mismo cultivo y que puede ser incorporada nuevamente en el mismo proceso productivo⁴⁷ (Figura 12).

⁴⁶ <http://www.elpais.com.co/colombia/despacho-mas-de-500-millones-de-flores-a-ee-uu-por-san-valentin.html>

⁴⁷ El reúso y la recirculación en Colombia están sujetos a la normatividad existente, especialmente en el sector agrícola (Resolución 1207 de 2014).

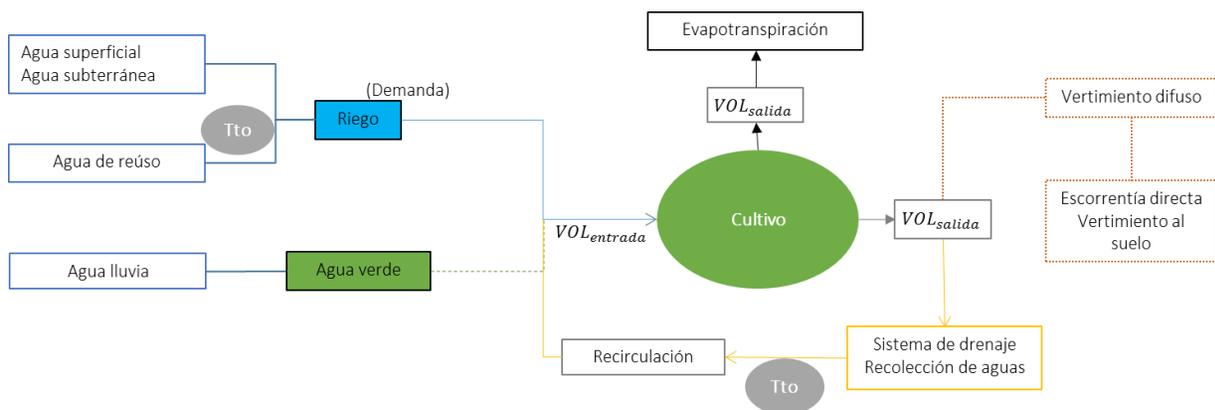


Figura 12. Esquema de uso del agua en el sector agrícola
Fuente: Elaboración propia

El agua que ingresa al cultivo es empleada en la producción de biomasa y una parte regresa a la atmósfera por medio de la evapotranspiración. El excedente de agua de riego constituye otro volumen de salida, el cual para la mayoría de los cultivos corresponde a vertimientos difusos, que puede ser en forma de escorrentía superficial directa, o infiltrado en el suelo, una parte del cual genera escorrentía subsuperficial y otra parte se percola a los acuíferos. En algunos cultivos, como en el caso de las flores, parte del volumen de salida del cultivo, conocido como lixiviado (solución drenada de agua con fertilizantes) es irrigado nuevamente en el mismo cultivo o incluso en otros cultivos, lo cual ayuda a la eficiencia en el uso del agua y de los fertilizantes. A este proceso se le conoce como recirculación del agua y puede realizarse de manera directa, sin embargo es probable que implique un tratamiento previo (Paéz, 2008) (Cuadro 1). Así las cosas, la eficiencia del uso del agua en los cultivos podría definirse como la relación entre el requerimiento de riego teórico (agua azul) y la demanda hídrica, la cual será menor si se emplean fuentes como el reúso o la recirculación (Ecuación 7).

Ecuación 7. Eficiencia en el uso del agua en el sector agrícola

$$Eficiencia = \frac{Requerimiento\ de\ riego}{Demanda\ hídrica} * 100$$

Cuadro 1 Caso de éxito. Recirculación de agua en cultivos de flores

El proceso consiste en recolectar el agua usada en la fertilización para luego ser transportada mediante tubos hacia un tanque. Posteriormente, la solución pasa por un proceso de filtrado, con el fin de impedir la entrada al sistema de materia orgánica o materiales extraños que puedan obstruir el sistema. También está previsto el uso de desinfección con radiación UV, para evitar que bacterias u hongos recirculen en el sistema. Luego se determina la cantidad de agua drenada a utilizar mediante el uso de sensores de ultrasonido, que miden los caudales, y otros sensores de conductividad, pH y nutrientes, que miden la calidad del agua de drenaje. Este tipo de proyectos han sido implementados principalmente para la sabana de Bogotá, en donde existen más de seis mil hectáreas en flores; en estos han participado la Universidad Nacional de Colombia, el Sena, Ceniflores y Colciencias (Paéz, 2008) y el Programa de Producción más Limpia- RedEsCAR-Universidad de los Andes, CAR y Asocolflores⁴⁸

La productividad del agua, por su parte se refiere al aumento en la producción con el empleo o degradación de menos recursos (Descheemaeker et al., 2013). La mejora en la eficiencia en el uso del agua tendrá como consecuencia aumento en la productividad de la misma lo cual a su vez trae beneficios

⁴⁸ <http://experiencias.florverde.org/>

adicionales de ahorro en los costos de producción (WWAP, 2016). A nivel mundial, en los últimos cuarenta años, la productividad física del agua casi que se ha duplicado; es decir que sólo la mitad de agua es necesaria para producir la misma cantidad de alimentos que en la década de 1960 (UNESCO, 2006). Según Alata Olivares (2005), entre 1961 y 2001 la productividad del agua en la agricultura se incrementó al menos en un 100%, lo cual se atribuye especialmente al **aumento en los rendimientos de los cultivos y en alguna medida a mejoras en los sistemas de suministro de agua**, sin embargo este sigue siendo un tema que genera preocupaciones por la ineficiencia técnica que aún existe en los sistemas y los métodos de riego. Según la FAO la eficiencia en los sistemas de riego es inferior al 40%, dadas las pérdidas por fugas y filtraciones de los canales de conducción, así como los excesos en los volúmenes de agua empleada en relación con las necesidades de los cultivos.

Según el Banco Mundial (2014), en Colombia, las actividades agropecuarias utilizan el 54,3% del agua dulce extraída a escala nacional. Los países con mayores extracciones en este sector fueron Somalia (99,5%), Afghanistan (98,6%), Nepal (98,1%), Malí (97,9%) y Madagascar (97,8%). Mientras que Finlandia, Luxemburgo, Bélgica, Alemania, Países Bajos, República Centroafricana, Eslovenia, Estonia y Papua Nueva Guinea presentan tasas inferiores al 1%.

Dado que **la eficiencia en el uso del agua está directamente relacionada con la eficiencia en los sistemas de riego y los métodos de aplicación del mismo, este estudio se refiere a ellos específicamente para apoyar el diagnóstico de las principales causas en la ineficiencia y baja productividad del agua en el sector agrícola**. Se estima que a 2030 se aumentará el uso del agua en un 20% si no se buscan mejoras en la eficiencia (WWAP, 2016), lo cual se constituye en un panorama crítico bajo un escenario de escasez de agua y cambio climático (Hoekstra, Mekonnen, Chapagain, Mathews, & Richter, 2012).

4.1.1 SISTEMAS DE RIEGO

Se refiere al conjunto de obras de infraestructura destinadas a dotar un área determinada con riego, tienen por lo general cuatro componentes (Tabla 14) y tres tipos de eficiencias asociadas, tal como se esquematiza en la Figura 13, por lo que la eficiencia del sistema de riego puede estimarse mediante la Ecuación 8 (Nuñez, 2015).

Ecuación 8. Eficiencia del riego

$$Eficiencia = EF_c * EF_d * EF_a$$

Donde:

EF_c = Eficiencia en la conducción

EF_d = Eficiencia en la distribución

EF_a = Eficiencia en la aplicación

Tabla 14. Principales obras de un sistema de riego

Obra	Descripción
Captación y/o almacenamiento	Bocatoma en la que se capta y deriva el agua desde la fuente de abastecimiento hacia el sistema de riego. Conformada por el muro de una pequeña presa, un canal o tubería de aducción y un desarenador; el primero para subir el nivel del agua y dirigirla hasta la aducción o estructura de derivación y el último para separar los sedimentos más gruesos del agua que se va a conducir. La captación de aguas subterráneas se realiza a través de pozos y de sistemas de bombeo.
Conducción	Canales o tuberías y demás elementos y obras complementarias que sirven para transportar el agua desde el desarenador hasta un tanque de almacenamiento desde donde se alimenta la red de distribución, o directamente hacia esta última.

Obra	Descripción
Distribución predial	Red de canales o tuberías que existen en los predios para la entrega de los caudales requeridos por cada usuario.
Distribución intrapredial	Obras dentro de las parcelas o predios destinadas a suministrar el agua a los cultivos y que están asociadas a los métodos de riego

Fuente: (INAT, 2003)

En la conducción y distribución, las pérdidas son debidas principalmente a la filtración del agua en las juntas o uniones entre elementos o por la falta de revestimiento de los canales y el mal estado de los mismos. Por su parte, al interior de la parcela, las pérdidas son debidas principalmente al método de riego, a factores físicos como la pendiente del terreno (existen mayores pérdidas en terrenos mal nivelados) y otros factores operativos **relacionados con el manejo que se le da al agua al interior de cada parcela, que tienen que ver con la planeación del riego** y la habilidad de quien lo aplica, así por ejemplo, factores como el tiempo de aplicación del riego influyen, si se tiene en cuenta que puede existir escurrimiento superficial o percolación profunda si se riega a destiempo (Nuñez, 2015).

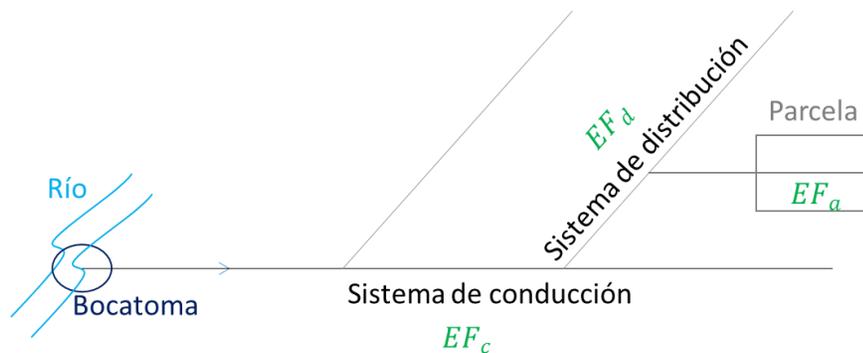


Figura 13. Componentes de un sistema de riego y sus eficiencias asociadas
Fuente: elaboración propia

En Colombia, los distritos de riego hacen parte del subsector de adecuación de tierras y son considerados como un servicio público desde la Ley 41 de 1993⁴⁹. Actualmente, la Agencia de desarrollo Rural (ADR) está a cargo de ejecutar la política de desarrollo agropecuario y rural (ADR, 2017), cuenta con una base de datos de 733 distritos, de los cuales 731 se encuentran en el Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA)⁵⁰(Figura 17). De estos distritos, 18 son de gran escala (mayores a 5.000 ha), 18 de mediana escala (entre 500 y 5.000 ha) y 697 de pequeña escala (menores a 500 ha) (Figura 14) (UPRA, 2015). Los dos distritos de la base de datos de la ADR que no se reportan en la del SIPRA son los de La Miel en el Tolima y La Ceiba-La Sabana en Santander.

⁴⁹ "Por la cual se organiza el subsector de adecuación de tierras y se establecen sus funciones"

⁵⁰ Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria de la UPRA.

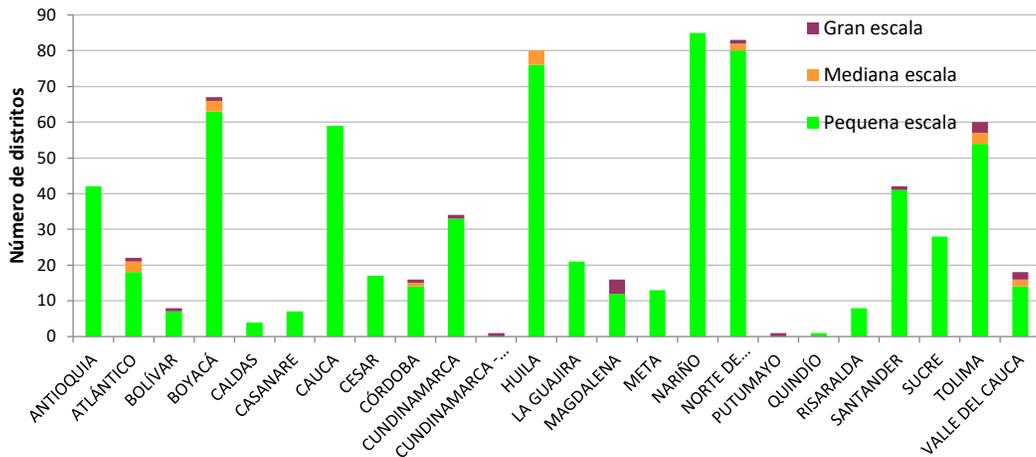


Figura 14. Distritos de adecuación de tierras por departamento en Colombia
Fuente: Elaboración propia a partir de información suministrada por la ADR (2017)

Las dos bases de datos mencionadas comparten los mismos atributos, en donde se consignan datos como: localización del distrito (departamento, municipio y vereda o corregimiento), nombre, escala y tipo del distrito, nombre de la asociación de usuarios, área y número de familias beneficiadas, distritos que se encuentran en operación, distritos con concesión de aguas, nombre de la fuente hídrica abastecedora, principales cultivos y resolución de personería jurídica. Sin embargo, los distritos que se encuentran en la base de datos de la ADR cuentan con cuatro atributos adicionales, estos son: asociaciones en funcionamiento, asociaciones que cuentan con personería jurídica, fecha de la resolución de la personería jurídica y titularidad de la propiedad del distrito o recursos.

De los distritos reportados por la ADR, 526 se encuentran en funcionamiento, beneficiando un área de 303.694,5 Ha (Figura 15) y 74.116 familias; de estos distritos solo 341 cuentan con concesión de aguas (Figura 16). En cuanto a la administración de los distritos se encontró que cerca de 159 son privados, 80 son administrados por la ADR y 404 fueron entregados en propiedad a Asociaciones de Usuarios. En el Anexo 2, se encuentra para cada distrito reportado en la base de datos suministrado por la ADR, información como: municipio, vereda, nombre del distrito, nombre de la Asociación, escala, tipo, área beneficiada, número de familias beneficiadas, nombre de la fuente, principales cultivos irrigados, titularidad, entre otros.

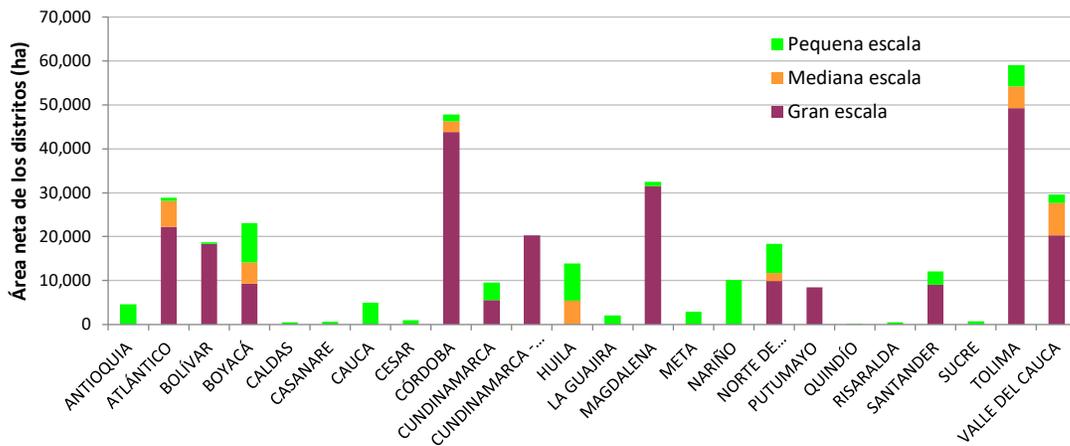


Figura 15. Área neta en los distritos de adecuación de tierras por departamento en Colombia
Fuente: Elaboración propia a partir de información suministrada por la ADR (2017)

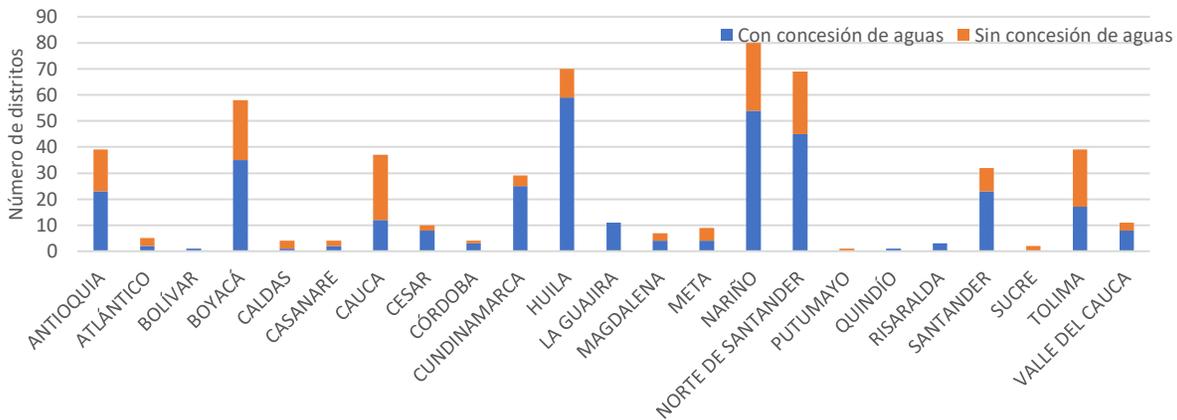


Figura 16. Distritos de adecuación de tierras con concesión y sin concesión de aguas por departamento en Colombia
Fuente: Elaboración propia a partir de información suministrada por la ADR (2017)

En la Evaluación del Programa Nacional de Adecuación de Tierras (PRONAT), se encontró que no hay consenso en las cifras de áreas bajo riego (DNP, 2016). Según la Agencia de Desarrollo Rural (ADR), en Colombia existen 303.694,5 hectáreas de tierras irrigadas⁵¹, las cuales corresponden al 3,5% del área agrícola según el Censo Nacional Agropecuario – CNA, que es de 8.577.010 hectáreas (DANE, 2016). Por su parte, la UPRA calcula que, de los 15,9 millones de hectáreas potenciales para desarrollar proyectos de riego y drenaje del país, sólo el 7% cuenta con algún tipo de adecuación (DNP, 2016). Posteriormente, en el mapa zonificación de áreas potenciales para adecuación de tierras (ADT), elaborado por la UPRA, el área con potencial para irrigación, es de 16.154.735 hectáreas (UPRA, 2015).

Pese a las discrepancias encontradas, algunos datos sobre áreas irrigadas pueden obtenerse de las bases de datos consultadas. Según la base de datos suministrada por la ADR, Nariño presenta el mayor número

⁵¹ Base de datos suministrada por la ADR (2017).

de distritos de riego (85 de pequeña escala), aportando a un área neta de 10.165 ha, le siguen Norte de Santander y Huila con 83 y 80 distritos, respectivamente. El Tolima presenta la mayor área neta en distritos de riego (59.071 ha), con 54 de pequeña escala, tres de mediana y tres de gran escala, que benefician cerca de 6.254 familias. El segundo departamento en extensión de distritos de riego es Córdoba con 47.784 ha en 16 distritos y el tercero, Magdalena con 31.510 ha en cuatro distritos de gran escala.

Adicionalmente, se identificó que, si bien los distritos de riego del país cuentan con información de localización, escala, fuente abastecedora, principales cultivos irrigados, administración e información de caracterización general, se encontró que solo para 13 distritos de mediana y gran escala se tienen algunas mediciones indispensables para la estimación de la eficiencia y productividad del agua, como la capacidad de derivación, tipo de riego, volumen de agua captada y caudales de retorno. Esta información reposa en una base de datos que no es pública y fue suministrada por el INCODER para el ENA 2014 y se encuentra en el Anexo 2. Por su parte, de las bases de datos de la ADR y de la UPRA no se pueden obtener el tipo de método de riego de cada uno de los distritos, sin embargo, esta información se encuentra para 527 distritos de riego en la base de datos del SIGOT, en donde cerca del 75% de los distritos reportados son por aspersión y cerca del 18% por gravedad, el porcentaje restante corresponde a la combinación de los dos. Adicionalmente, aunque en el SIPRA se cuenta con los distritos georeferenciados, es importante mencionar que solo 81 cuentan con los polígonos de área beneficiada, el resto de los distritos es espacializado mediante geometría de puntos (Figura 17).

En la Tabla 15, se muestran los distritos de gran escala y se mencionan los principales cultivos irrigados. En el Valle del Cauca por ejemplo, existen dos distritos de gran escala, uno de ellos tiene administración privada, el otro corresponde al distrito RUT administrado por el estado, este último es uno de los más importantes en el suroccidente del país, en donde los cultivos tradicionales han sido sorgo, maíz, soya y algunos frutales, sin embargo, a partir de los años 90, la caña de azúcar sufrió una importante expansión, ocupando al 2014 el 48% del área de influencia del distrito (UPRA, 2015; Urrutia Cobo, 2006).

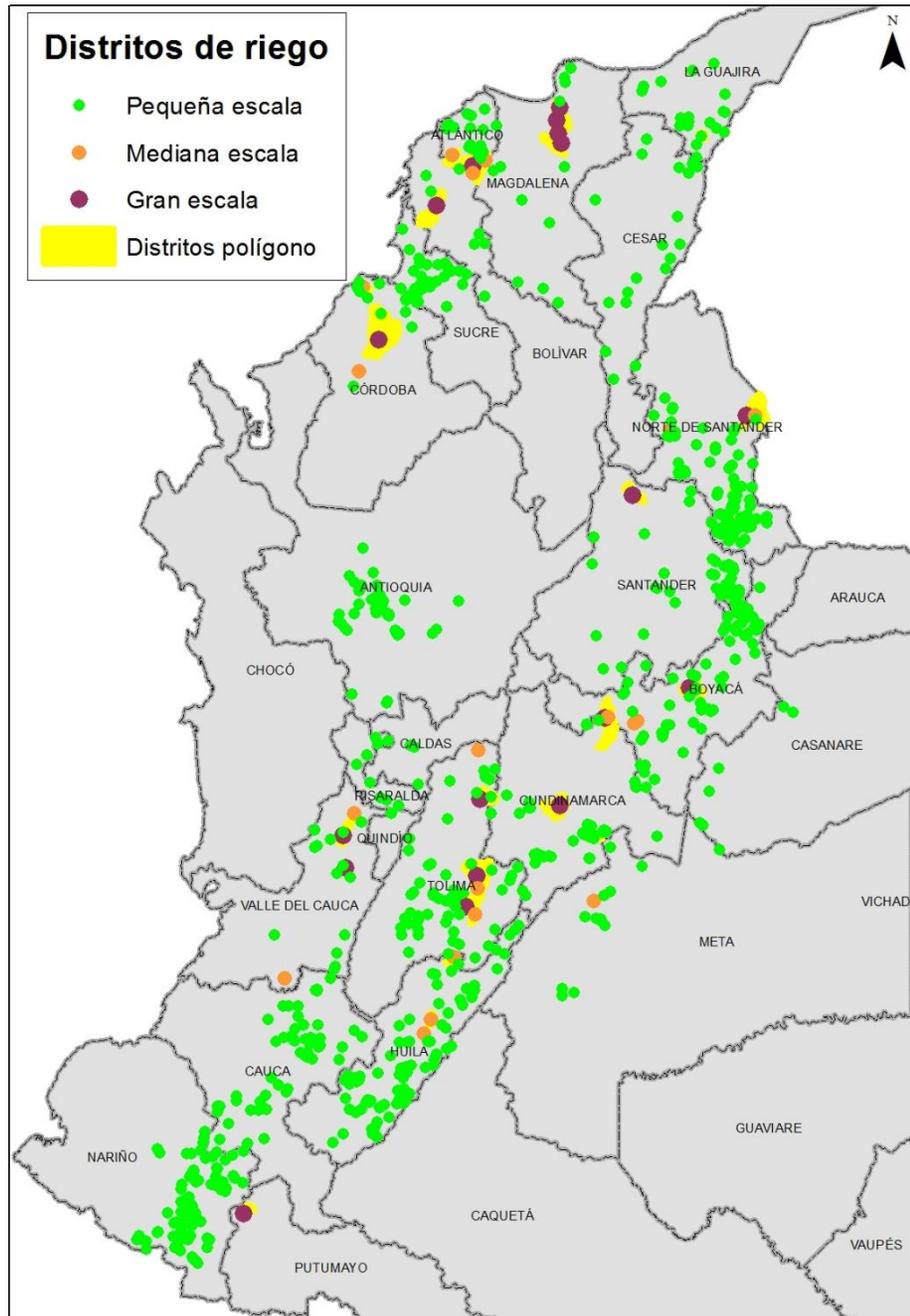


Figura 17. Distribución de los distritos de adecuación de tierras según su escala en Colombia

Fuente: Elaboración propia a partir del SIPRA (UPRA, 2015)

Tabla 15. Distritos de adecuación de tierras de gran escala en Colombia

Departamento	Municipio	Administración	Distrito	NOMBRE ASOCIACIÓN DE USUARIOS	NOMBRE FUENTE HIDRICA	Principales cultivos
Atlántico	Manatí	ADR	Manatí - Candelaria	ASUDREMA	Canal del Dique	Yuca, sorgo, pancoger, maíz , papaya, cítricos, guayaba, patilla, tomate, pastos , ahuyama, mango
Bolívar	María la Baja, Arjona y Mahates	ADR	María la baja	USOMARÍALABAJA - (USOMARÍA, ASODIMAR Antes)	Embalse Arroyo Grande y Arroyo Matuyá	Palma africana, arroz, plátano, maíz, pasto , frutales, caña , ají
Boyacá	Paipa, Duitama, Tibasosa, Nobsa, Sogamoso, Santa Rosa, Firavitoba	ADR	Alto Chicamocha y Firavitoba	USOCHICAMOCHA	Río Tuta (Embalse La Copa) y Río Chulo (Embalse La Playa) forman Río Chicamocha	Cebolla, Repollo, Papa , Alverja, Frijol, Maíz , lechuga, Brócoli, Zanahoria, Remolacha, Espinaca, Frutales de clima frío, Pastos
Córdoba	Montería, Cereté, San Carlos, Ciénaga de Oro, San Pelayo y Cotorra	ADR	Montería - Mocarí	ASORIEGOSINU (ASUMOCARI Antes)	Río Sinú	Arroz , algodón, maíz , sorgo, pastos, ganadería
Magdalena	Aracataca	ADR	Aracataca	USOARACATACA	Río Aracataca, Río Fundación	Palma africana, pastos, banano, arroz , rastrojos, pancoger, cítricos, yuca, frutales, cacao.
	Zona bananera		Río Frio	ASORIOFRIO	Río Frio	Banano, palma africana , pancoger, frutales, mango, limón
	Zona bananera		Tucurínca	ASOSEVILLA	Río Sevilla	Banano, palma africana , frutales, pancoger
	Zona bananera	Asociación de usuarios	Sevilla	ASOTUCURINCA	Río Tucurínca	Palma africana, banano, arroz , frutales, pastos, pancoger, ganadería
Norte de Santander	El Zulia	ADR	Zulia	ASOZULIA	Río Zulia	Arroz, palma , cacao, plátano, pastos , yuca
Putumayo	Colón, Santiago, San Francisco y Sibundoy	ADR	Valle de Sibundoy	ASOVALLE DE SIBUNDOY	Drenaje	Pastos , Frijol, Maíz , Manzana, Papa , Hortalizas, Lulo, Frutales, Granadilla, Mora, Lulo, trucha
Santander	Sabana de Torres	ADR	Lebrija	ASOLEBRIJA	Río Lebrija	Palma de Aceite, Pastos, Arroz , Sorgo, Maíz , Yuca
Tolima	Guamo, Espinal	Asociación de usuarios	Coello y Cucuana	USOCOELLO	Río Coello y Río Cucuana	Arroz , algodón, sorgo, soya, pastos
	Lérida y Ambalema		Río Recio	ASORRECIO	Río Recio	Arroz , algodón, sorgo, soya, frutales, pastos
	Saldaña y Purificación		Saldaña	USOSALDAÑA	Río Saldaña	Arroz , frutales, algodón, sorgo
Valle del cauca	Bugalagrande	Privados	Ribu	ASORIBU	Río Bugalagrande	Caña
	Roldanillo, La Unión, Toro	ADR	RUT	ASORUT	Río Cauca	Algodón, Caña de Azúcar, Maíz , Sorgo, Soya, Vid Frutal, Guayaba, Maracuyá, Papaya, Melón, Hortalizas

Fuente: Elaboración propia a partir del SIPRA (UPRA, 2015)

4.1.2 MÉTODOS DE RIEGO

Corresponden a las técnicas empleadas para suministrar el agua a los cultivos al interior de las parcelas; éstos se pueden clasificar en dos grupos principales: gravedad o presión. El primero, agrupa las técnicas más empleadas en Latinoamérica y corresponden al riego por superficie, a través de zanjas o surcos que distribuyen el agua por canales o por inundación, que distribuyen el agua por gravedad a través de la superficie del terreno, como en el caso del arroz (Mafla, Cabezas, & Carrasco, 2002). Este último método es considerado como el de menor eficiencia y uno de los más económicos, en parte debido a que no es necesaria la nivelación del terreno (Nuñez, 2015).

En el método de riego por surcos, la eficiencia está determinada en gran medida por la pendiente del terreno y el tipo de suelos. En suelos arcillosos, el movimiento del agua se da con mayor facilidad en sentido lateral, contrario a suelos arenosos, en donde el agua puede infiltrarse más fácilmente (Nuñez, 2015). En este método de riego, la aplicación excesiva de agua puede causar problemas erosivos y de sedimentos, por lo que aplicar la cantidad correcta de agua es uno de los factores más importantes.

Entre los métodos por presión se encuentran la aspersión, el riego localizado y la microaspersión. El agua es transportada por medio de tuberías y necesita una presión adecuada para poder proporcionar el riego. El riego por aspersión distribuye el agua de una manera similar a la lluvia empleando equipos de bombeo, para su aplicación no es necesaria la nivelación del suelo y es más eficiente si se emplea la presión y el aspersor adecuado. La eficiencia de este método depende en gran medida del buen estado de los equipos y de unas buenas condiciones en su manejo y operación (Nuñez, 2015).

En el método de riego por goteo, se aplican cantidades de agua moderadas en la superficie del suelo y alrededor de las raíces de las plantas, por lo que es uno de los más eficientes, debido a que es aplicado en las cantidades estrictamente necesarias y en los tiempos oportunos (Mafla et al., 2002). Este método requiere de una red de tuberías y laterales de riego con goteros que entregan agua directamente a la zona radicular permitiendo que el cultivo permanezca en condiciones óptimas de humedad y evitando el desarrollo de malezas y de plagas o enfermedades, estos sistemas pueden ser instalados en cualquier tipo de suelo y condiciones topográficas.

Los métodos de riego presentan diferentes eficiencias (Tabla 16); mientras menores sean las pérdidas en el sistema más alta es la eficiencia y por ende, mayor la productividad del agua, tal como se demostró en México tras la tecnificación del riego ante un escenario de escasez de agua (Cuadro 2) y en Colombia, en el Valle del Cauca tras la implementación del riego por goteo (Cuadro 3).

Tabla 16. Eficiencias en los sistemas de riego reportados en Latinoamérica y los empleados en Colombia

Reportado para Latinoamérica		Reportado para Colombia		
Método de riego	Eficiencia (%)	Método de riego	Eficiencia (%)	Porcentaje de participación (%)
Gravedad	30-70	Aspersión	75	24,1
Aspersión	80-85	Mixto	70	23,9
Goteo	Mayor a 90	Gravedad	50	23,5
		Goteo	90	11,4
		Manual o por mateo		8,7
		Bombeo		8,5

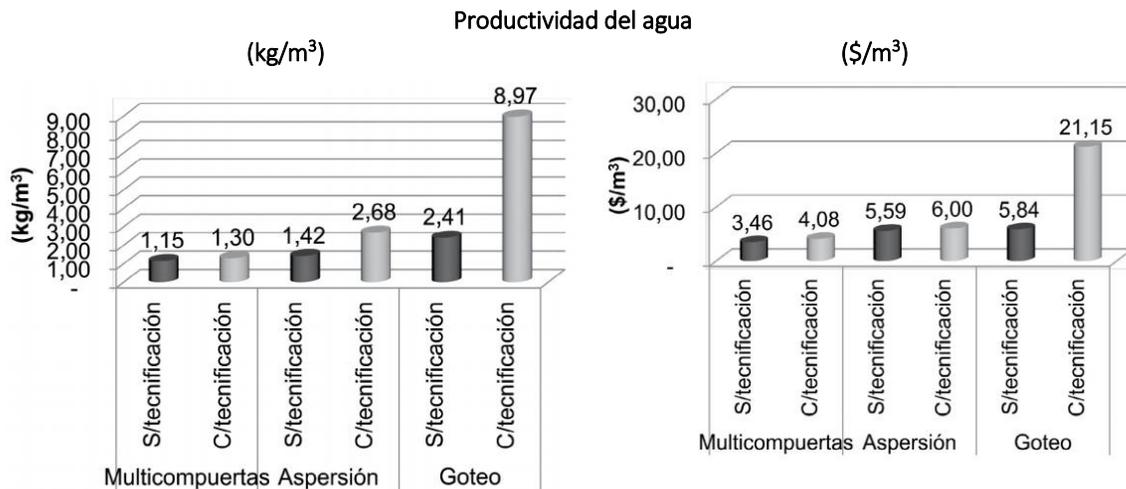
Fuente: Elaboración propia a partir de (DNP, 2016; IDEAM, 2015a; Mafla et al., 2002; Nuñez, 2015)

Cuadro 2 Caso de éxito. Aumento en la eficiencia y productividad del agua en México

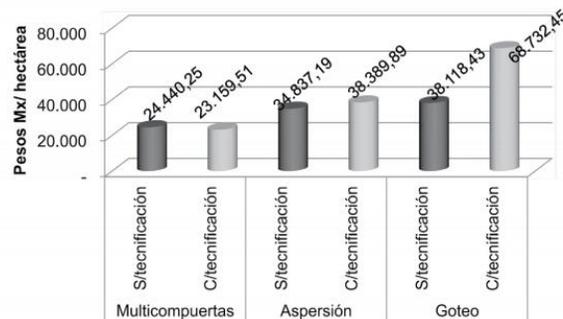
La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos. Estudio de caso en Chihuahua, México (Olvera-Salgado, Bahena-Delgado, Alpuche-Garcés, & García-Matías, 2014)

El estudio se llevó a cabo en el distrito DR 005, Delicias, Chihuahua, el cual pertenece a la cuenca del río Bravo, donde en el periodo 1993-2003 se tuvo una sequía calificada de “extrema”, evidenciada en una reducción en el cauce de los ríos y el nivel de las presas. La investigación tuvo como objetivo analizar la productividad del agua y el impacto de la tecnificación del riego sobre ella y el rendimiento de los cultivos. Se analizaron fincas agrícolas pares, 26 irrigadas por medio de gravedad y 26 irrigadas con métodos tecnificados; se usó el método comparativo para dos escenarios: el antes, como la condición previa a la tecnificación del riego en el año 2003 (riego por gravedad) y el después en 2012-2013, en la superficie con riego tecnificado (multicompuestas, aspersión y goteo). Dentro de los cultivos analizados se encuentran: cacahuete, césped de centeno, alfalfa y maíz forrajero.

Los resultados mostraron que, analizando la relación cultivo-sistema de riego, hubo incremento de los rendimientos en todos los cultivos, especialmente en el método por goteo. Así mismo sucedió al analizar el índice de producción del agua en $\$/m^3$. Adicionalmente, se encontró que el ingreso neto que percibe el productor por cada hectárea cosechada también aumentó en los métodos con tecnificación, lo cual permite advertir que la tecnificación, además de favorecer el ahorro de agua y por lo tanto la conservación del recurso, propicia cambios en la economía del productor con riego.



Ingreso neto al productor (Pesos Mexicanos/hectárea)



Así mismo, se estableció que el riego tecnificado es más eficiente dependiendo del cultivo, el goteo es más eficiente en hortalizas, la aspersión en cultivos forrajeros o árboles y el riego con multicompuestas en cultivos

como el maíz, cacahuate o forrajes. Además, cambios en la producción, ambientales, sociales y económicos fueron identificados, así se produjo un ahorro de 63,4 Hm³, una producción adicional de 124.662 Ton de producto agrícola anuales, 611.008 jornales anuales adicionales (48 jornales generados por hectárea) y un ingreso de 8.900 MX\$/ha, equivalente a 691,5 US\$). De lo anterior se concluye que la tecnificación del riego ha propiciado un mejor uso del agua y un aumento de la disponibilidad de alimentos.

La tecnificación del riego se muestra como una alternativa para el uso eficiente del agua y la producción agrícola; sin embargo, se deben considerar aspectos de capacitación y asesoría al productor agrícola sobre operación del sistema de riego, cuándo y cuánto regar, para que efectivamente se propicie un ahorro de agua y se genere mayor cantidad de alimentos provenientes de la agricultura.

Cuadro 3. Caso de éxito. Aumento en la eficiencia y productividad del agua en Colombia.

Ingenio Pichichi (Valle del Cauca) (Ingenio Pichichi, 2016)

En el Ingenio Pichichí, dedicado a la fabricación y comercialización de productos derivados de la caña de azúcar, con la instalación de sistemas como el riego por goteo, la extensión de las conducciones de agua en tubería para disminuir pérdidas por infiltración y evaporación y la reutilización de las aguas residuales resultantes del proceso de fabricación de azúcar, se ha observado una disminución en el consumo de agua por hectárea de 1.958 a 1.079 m³, entre el año 2003 y 2016.

4.1.3 ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA

Como se mencionó anteriormente, **en el país no existe información detallada sobre los distritos de riego, especialmente sobre el uso, pérdidas y retornos de agua.** La información espacial con que se cuenta reposa en la base de datos del SIPRA, sin embargo, no existen datos que permitan realizar análisis estadísticos, **no se tiene información sobre el tipo de captación de cada distrito, capacidad de derivación, tipo de riego, volumen de agua captada ni volumen de retorno, por lo que la estimación de la eficiencia en cada uno de los distritos actuales no ha sido posible.** No obstante, respecto a los distritos de gran escala, la Cuenta del Agua estimó que estos extraen cerca de 463 millones de metros cúbicos de fuentes superficiales, de los cuales el 50% es utilizado en el riego de cultivos, mientras que el 50% restante se consideran pérdidas. Así las cosas, en general, la eficiencia del uso en el suministro de riego por parte de los distritos es del orden del 50% (DANE & IDEAM, 2015b).

Debido a la insuficiente información sobre los distritos de adecuación de tierras, especialmente sobre los datos de volúmenes de agua captada y volúmenes de retorno, **no es posible identificar que volumen de agua es extraído para el riego de cada tipo de cultivo,** lo cual impide el cálculo de la demanda hídrica por cultivo. Por esta razón, los cálculos de demanda han estado basados en la huella hídrica, es decir en la estimación del requerimiento hídrico del cultivo a partir del cálculo de la evapotranspiración⁵², metodología que se ha ido precisando por UPRA para los procesos de zonificación de aptitud agropecuaria en Colombia. Esta metodología de estimación de la demanda hídrica, basada en la relación entre el requerimiento hídrico y la eficiencia de los tipos de riego, fue empleada en el ENA 2014.

Para este cálculo, el ENA 2014 estableció una base de datos en donde se consignan las eficiencias asociadas a 254 municipios, según el tipo de riego que reportaban los distritos compilados en el SIGOT (Anexo 3); la eficiencia reportada por municipio se observa en la Figura 18. Estos valores de eficiencia

⁵² Metodología basada en el Estudio Evapotranspiración del Cultivo (Allen, Pereira, Raes, Smith, & W, 1998)

fueron asignados a cada uno de los cultivos que reportaron los distritos de riego, en el caso de que no se tuviera reporte del cultivo por parte de los distritos de riego, se asignó una eficiencia del 50%. Así las cosas, se asignaron eficiencias por cultivo y por municipio para 35 cultivos. El promedio de eficiencia resultante para los cultivos permanentes en Colombia es de 53,8%, para los transitorios es de 51,8% y para los pastos de corte y forraje es de 60,8%⁵³.

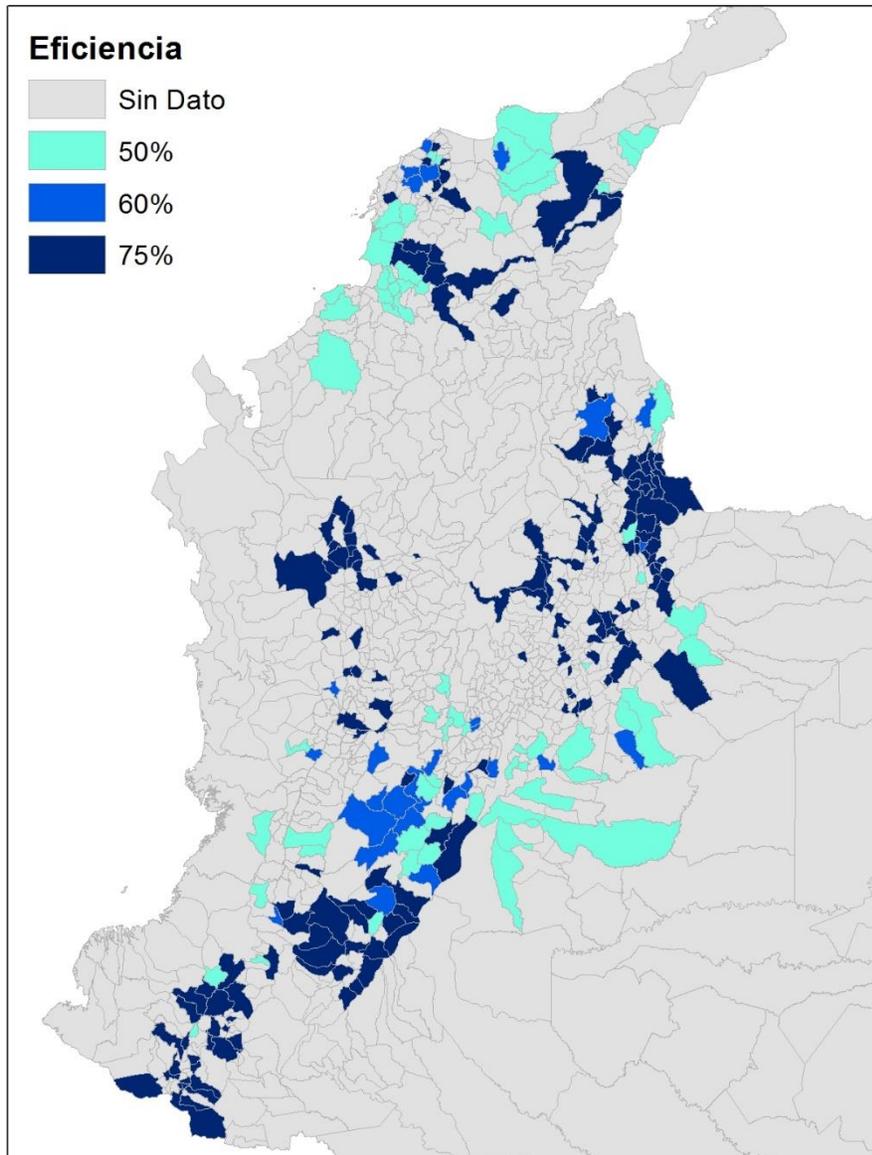


Figura 18. Eficiencia promedio por municipio según los distritos de riego reportados en el SIGOT
Fuente: Elaboración propia a partir de INCODER (2007).

Los 254 municipios que reportaron un valor de eficiencia se localizan en 22 departamentos, para los cuales se muestran los valores promedio de eficiencias según el tipo de riego encontrado (Figura 19). Se observan las menores eficiencias asociadas el método de riego por gravedad (50%) en los

⁵³ Información extraída de las bases de datos del ENA 2014.

departamentos de Sucre, La Guajira y Córdoba y las eficiencias más altas asociadas al método por aspersión (75%) en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cesar y Quindío.

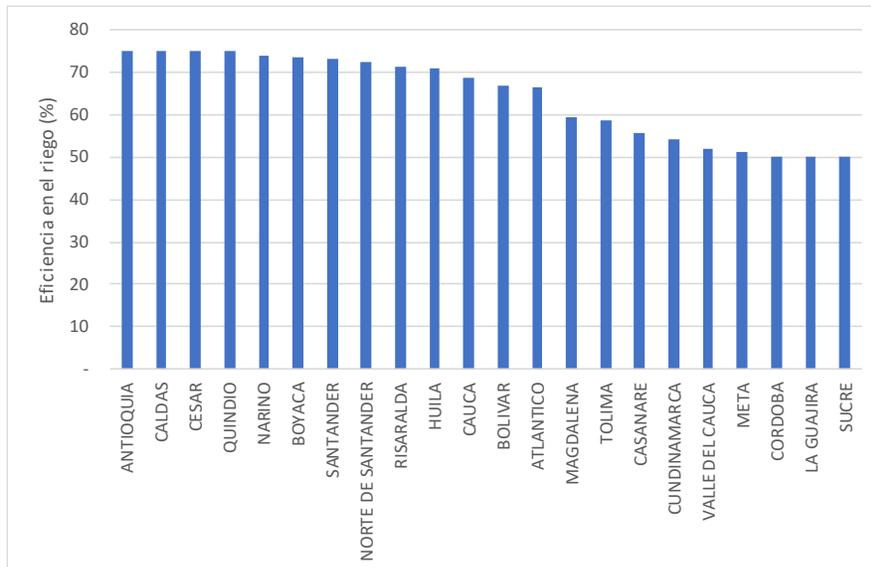


Figura 19. Eficiencia promedio por departamento según los distritos de riego reportados en el SIGOT
Fuente: Elaboración propia a partir de INCODER (2007).

En el ENA 2014, los resultados arrojaron que la demanda hídrica total del sector agrícola es de 16.760,3 millones de metros cúbicos y el requerimiento de riego de 6.942,4 millones de metros cúbicos. Con estos valores se infiere que en promedio la **eficiencia para el sector agrícola es de 41%**. Los valores de demanda hídrica y requerimiento hídrico estimados en el ENA 2014 para los cultivos priorizados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Requerimiento de agua de riego para los cultivos priorizados en Colombia

Cultivo	Requerimiento de riego (Millones de m ³)	Demanda (Millones de m ³)
Pastos de corte	1.744,8	3.229,8
Palma de aceite	975,7	1.793,6
Plátano	938,3	1.760,0
Caña de azúcar	774,9	1.476,2
Arroz de riego	444,5	1.778,1
Pastos de forraje	432,1	799,2
Banano	238,2	446,1
Papa	111,7	221,2
Maíz	103,2	207,4
Flores y follajes	56,1	103,9

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM, 2015a).

La información que se encuentra disponible sobre demanda hídrica y requerimiento hídrico por cultivo se encuentra escala de subzona hidrográfica (SZH), para los diez cultivos priorizados; a esta escala se encontró que existen dos subzonas con altas demandas en el Magdalena-Cauca, correspondientes a la

Ciénaga Grande de Santa Marta y el Río Bogotá, y a otras dos SZH en el Caribe: Arroyos Directos al Caribe y Río Ranchería. A escala departamental se buscó también establecer las eficiencias en el uso del agua, encontrando dificultades en obtener los datos de demanda hídrica para los pastos de corte y forraje a escala de departamento. Sin embargo, teniendo en cuenta los ocho cultivos restantes se observa que los **departamentos de Tolima y Valle del Cauca, son los que mayor demanda hídrica y requerimiento de riego presentan**, principalmente dados por los cultivos de arroz y caña de azúcar que predominan en estos departamentos (Figura 20).

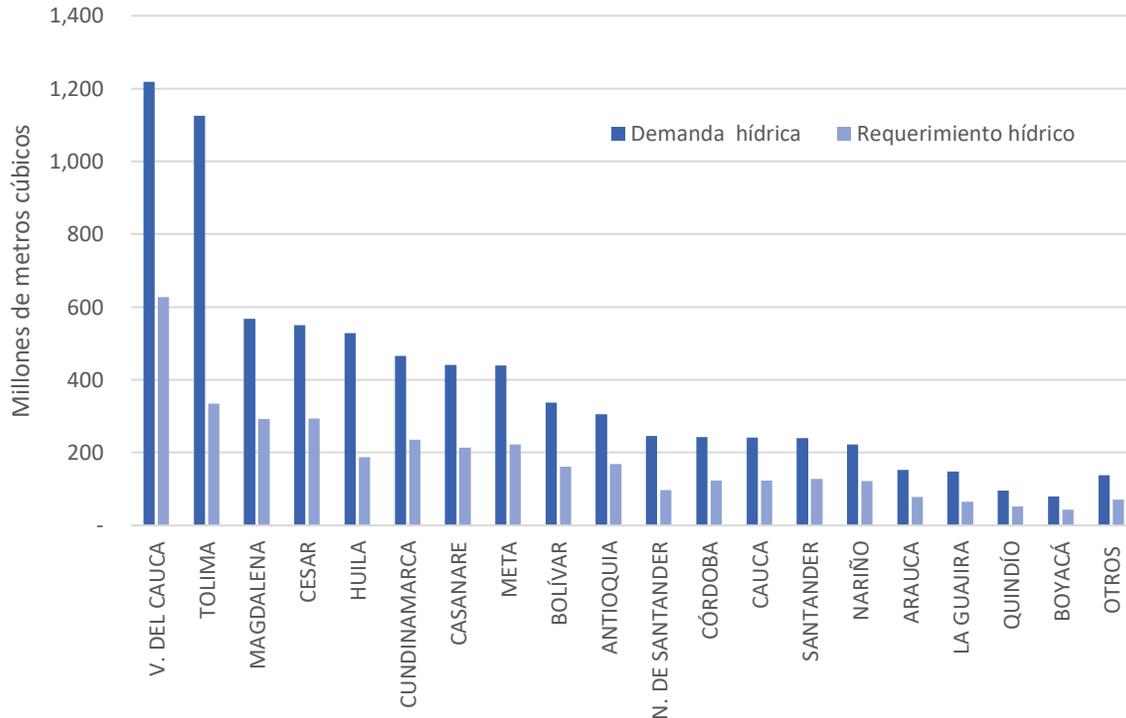


Figura 20. Requerimiento de agua de riego y demanda hídrica para los cultivos priorizados en Colombia⁵⁴

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM, 2015a).

4.1.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS PROBLEMAS DE EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

De acuerdo con lo encontrado en este diagnóstico, se han identificado factores que influyen significativamente en la eficiencia y productividad del agua en el sector agrícola, los cuales se encuentran en la Tabla 18.

Carrera

⁵⁴ El departamento del Vaupés no cuenta con áreas en cultivos priorizados.

Tabla 18. Factores identificados para el sector agrícola

Tecnológicos	Económicos	Políticos	Ambientales	Sociales
Diseño y operación de sistemas de suministro de agua	Inversión	Instrumentos económicos	Clima	Cultural
Tecnologías para uso eficiente del agua	Precio del agua	Institucionalidad	Disponibilidad hídrica	Capacitación
		Normatividad	Geomorfología y Suelo	Diversidad del sector
		Articulación en el ordenamiento	Especies	

En primer lugar, se debe tener en cuenta que **el sector agrícola es uno de los más diversos** en el contexto colombiano. Esta diversidad, incide en diferentes ámbitos, como el ambiental, social y económico. En lo ambiental, se tienen en cuenta factores que tienen que ver específicamente con el cultivo y el lugar en donde se produce, como el **clima, suelos, disponibilidad hídrica y requerimientos hídricos y de nutrientes de las plantas**. Así las cosas, la agricultura es altamente vulnerable a los cambios de las condiciones meteorológicas. El aumento de las temperaturas reduce la producción de los cultivos deseados y aumenta la demanda de agua por aumento de la evapotranspiración (FONADE & IDEAM, 2013). Mientras que los cambios en los regímenes de lluvias pueden aumentar las probabilidades de fracaso de las cosechas a corto plazo y reducir la producción a largo plazo (IFPRI, 2009).

Así mismo, existen diversos tipos de suelos, con características físicas y químicas diversas, por lo que la elección de sitios adecuados a las necesidades de los cultivos o viceversa puede aumentar la productividad del agua. En sistemas de cultivo irrigado como en sistemas de secano, la productividad del agua se puede mejorar eligiendo tipos de cultivos bien adaptados, reduciendo las pérdidas de agua y manteniendo cultivos saludables mediante un manejo optimizado del agua, nutrientes y conservación de la humedad del suelo (Descheemaeker et al., 2013) (Cuadro 4). Todos estos son factores que inciden en la productividad de las plantas ya que pueden ser limitantes para su crecimiento y producción deseada (Ali & Talukder, 2008). Así mismo, tal como se mencionó en el capítulo de eficiencia en el uso del agua, el tipo de suelos incide en los métodos y sistemas de riego empleados, los cuales a su vez tienen una alta influencia en la productividad del agua, ligada a la eficiencia en estos mismos métodos (Nuñez, 2015).

Cuadro 4. Caso de éxito. Aumento de la productividad en México.

Caso de la Comarca Lagunera en México
Una de las principales actividades económicas es la producción de leche de ganado bovino, por lo que existe una alta demanda de forraje de calidad, el cual se produce en condiciones de riego, pero con escasa disponibilidad de agua. En este estudio se incorporaron especies alternativas en los sistemas de producción forrajeros y se compararon los rendimientos de forraje y la productividad del agua de tres sistemas de especies alternativas respecto a dos sistemas tradicionales utilizados en el sitio de estudio. En cada especie se determinó la calidad de forraje y se estimaron los rendimientos y la productividad del agua en la producción de materia seca, proteína cruda y energía neta para lactancia, encontrando que con estas nuevas especies alternativas hubo un aumento en la productividad del agua del 60 al 75% (Reta Sánchez et al., 2010).

Esta diversidad del sector en lo socioeconómico incide en las brechas que pueden existir dadas las escalas de producción; es así como la forma en la que se organizan los agricultores para producir, los costos de transacción y los derechos de propiedad del agua son aspectos determinantes de la productividad del agua. Los pequeños productores, si no se encuentran integrados tienen menos posibilidad de acceso a mercados y de seleccionar productos con mayor valor económico; así mismo, las inversiones en las que deben incurrir para adquirir mayor tecnología pueden ser mucho mayores que las ganancias que el producto podría generarles (Ali & Talukder, 2008).

Otros factores influyentes tienen que ver con la adopción y mejoramiento de las formas de manejo de agua que generalmente vienen acompañadas con inversiones en tecnología, la adopción de sistemas de riego más eficientes, la incorporación de variedades de plantas menos demandantes de agua, la **cosecha de agua** (captura de aguas lluvias o precipitación horizontal en zonas de alta montaña con niebla) y técnicas administrativas que en conjunto mejoren la productividad de los procesos agrícolas (Barker, Dawe, & Inocencio, 2003). Dentro de estas mejoras de manejo del agua y usos de tecnologías, se destaca el proceso de **reúso del agua** como un determinante clave para aumentar la productividad ya que permite generar mayores niveles de producción, con un mismo volumen de agua que ingresa al sistema productivo (David Molden et al., 2010; Clement et al., 2011; Tuong et al., 2005). Estas medidas están en gran parte relacionadas con los sistemas de irrigación, para los cuales en Colombia se identificaron bajas eficiencias.

La primera de ellas tiene que ver con una **deficiente articulación entre el subsector de adecuación de tierras, el sector agrícola y el ordenamiento ambiental del territorio**; es así como las actividades encaminadas a la adecuación de tierras y el ordenamiento agrícola parecen no ir de la mano con los instrumentos de planificación como los POT, los POMCA y los PORH. Esta situación fue constatada por DNP (2016) al indagar por el conocimiento desde las administraciones de los Distritos de Adecuación de Tierras de estos instrumentos, la cual se hace más crítica si se tiene en cuenta la falta de articulación de estos instrumentos y la desactualización de los mismos en gran parte del país.

Adicionalmente, la priorización de los proyectos de adecuación de tierras no estaba articulada con el desarrollo productivo del sector agrícola, las condiciones de los mercados ni la gestión integral del recurso hídrico y de cuencas, y correspondían al desarrollo de infraestructura, sin un plan productivo marco que integrara estas obras físicas en programas y proyectos acordes a las necesidades del sector. Así las cosas, algunos distritos de adecuación de tierras con grandes inversiones terminaban siendo subutilizados en pequeñas producciones, lo cual evidentemente afecta la productividad del agua (CEPAL & DNP, 2014). Esta situación en parte se presentaba por la inexistencia de una guía eficiente para la priorización de proyectos de adecuación, con criterios técnicos y replicables para cualquier contexto y pese a la existencia de la "Guía ambiental para la construcción y operación de proyectos de adecuación de tierras (distritos de riego y/o drenaje)" (INAT, 2003), se consideraba **que no existían criterios unificados ni una manera de realizar una evaluación ex post con el fin de evaluar las inversiones y los proyectos ejecutados**. Para corregir estas falencias, actualmente se cuenta con el manual "Especificaciones técnicas generales para proyectos y distritos de adecuación de tierras" publicado por la ADR (2017).

La situación descrita, deja ver además una criticidad en términos de la **normatividad existente en el sector agrícola y ambiental**, la cual existe pero es dispersa y denota una falta de articulación política y de continuidad tras cada periodo electoral (Urrutia Cobo, 2006); así mismo, cada Ministerio fija unas prioridades sin tener en cuenta una articulación intersectorial, lo cual conlleva a que para inversión y

desarrollo sean priorizadas las actividades económicas con mayor aporte a la economía, desconociendo otro tipo de beneficios para el país como los sociales⁵⁵ o las restricciones de tipo ambiental. Así, se le ha dado prioridad al crecimiento económico del país, sin considerar las externalidades negativas en términos ambientales asociadas a ese crecimiento que van en contravía de un desarrollo sostenible.

Estas externalidades se evidencian en la presencia de conflictos por uso del suelo, que involucran la adecuación de tierras especialmente con usos urbanos y la intervención de ecosistemas estratégicos. Debido a la falta de integralidad en el manejo de los recursos y en relación con el ordenamiento de cuencas, los distritos se ven afectados por problemáticas como: baja disponibilidad de agua, sedimentación, mala calidad del agua, conflictos de uso del suelo y generación de residuos sólidos y líquidos (CEPAL & DNP, 2014; DNP, 2016).

Se encontró además que, pese a que existe una normatividad amplia en el sector, esta puede no llegar a ser efectiva, como en el caso de los **instrumentos económicos como la TUA**, la cual opera sin una medición precisa del volumen de agua concesionado a cada distrito o productor. Aunado a esto, el recaudo de la TUA no es eficiente debido a que cerca del 80% de los usuarios no cuentan con concesión de aguas por lo cual no pagan la TUA⁵⁶; así mismo, se ha reportado que el recaudo es inferior a las tasas facturadas. En consecuencia, el destino de estos recursos que deberían representar importantes inversiones en términos de conservación de las cuencas, no se ve reflejado, en parte porque el recaudo es muy bajo y en parte porque no siempre termina siendo destinado para este fin.

La vulnerabilidad al **cambio y a la variabilidad climática**, es otro de los aspectos que se consideran críticos y que tienen que ver también con esta falta de articulación. Es así como la gran mayoría de distritos, incluyendo los de mediana y gran escala son vulnerables a inundaciones, lo cual causa pérdidas a los productores y daños en la infraestructura, mientras que en un evento de sequía extrema se presenta riesgo por desabastecimiento (CEPAL & DNP, 2014). Se considera que el sector agrícola es el primer sector que debe concentrar esfuerzos en adaptarse al cambio climático en Colombia, lo cual implicaría la articulación entre la ordenación ambiental y productiva⁵⁷; en este sentido la UPRA ha venido trabajando sobre la zonificación agrícola en el país para establecer las zonas con mayor aptitud para el establecimiento de cultivos. Estos estudios deben definir las zonas en las que se debe invertir en temas de adecuación de tierras.

La **institucionalidad y competencias** es otro de los factores críticos para el sector agrícola. La adecuación de tierras en Colombia ha sido un tema que ha estado a cargo de diferentes instituciones. En la actualidad es la ADR la encargada de cumplir lo establecido en la ley para este servicio público, sin embargo, los usuarios y productores no tienen claridad sobre quien orienta y facilita este proceso en Colombia (CEPAL & DNP, 2014). En este mismo sentido, se destaca la importancia de instancias inexistentes a la fecha como el **Consejo Superior de Adecuación de Tierras**, como mecanismo de articulación y coordinación de los diferentes Ministerios⁵⁸.

A escalas más detalladas, se comenzó a impulsar a las Asociaciones de Usuarios para el desarrollo de algunos de los proyectos de ADT, sin embargo, aún no se cuenta con un mercado garantizado y seguridad jurídica para impulsar esta iniciativa. Estas Asociaciones tienen como función principal la administración

⁵⁵ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en el Taller comité consultivo 1 diagnóstico y priorización

⁵⁶ *Ibid.*

⁵⁷ *Ibid.*

⁵⁸ *Ibid.*

de su propio distrito, sin embargo, no todas ellas tienen los conocimientos y la capacidad para hacerlo, la mayoría no tienen unos objetivos claros y tampoco cuentan con estructuras organizacionales bien definidas (CEPAL & DNP, 2014).

En general el subsector de adecuación de tierras no cuenta con una estructura organizacional acorde a sus necesidades, con personal especializado y capacitado, ni existen programas de acompañamiento y capacitación continua para las Asociaciones. Igualmente, no existe una regulación en el servicio público de adecuación de tierras, ni registro actualizado de los usuarios. Por lo general, no existen cuotas de cobro o las tarifas son muy bajas, en especial en el caso de los distritos de pequeña escala, por lo que los recursos económicos para la operación y mantenimiento son escasos. CEPAL & DNP (2014) reportan además que no hay mecanismos de recuperación de cartera, no hay claridad en los títulos de propiedad de los predios, por lo que se afecta la gestión del cobro, ni tampoco se realiza reporte a las centrales de riesgos de los deudores morosos.

Se identifican además aspectos críticos como la **inversión del Estado y el modelo individualista** del productor, es decir la falta de asociatividad entre productores que predomina en el campo, observándose que además existen muchas zonas rurales en donde la inversión del Estado no se ha hecho presente, aspecto que tendrá gran relevancia en el escenario de posconflicto que se inicia. Así las cosas, al pequeño productor se le otorgan subsidios para producciones puntuales, fraccionando los recursos y afectando la eficiencia productiva. Adicionalmente, el **sector privado por lo general no ha apoyado económicamente el desarrollo de los proyectos estratégicos para el Estado** y no encuentra garantías a su inversión debido a la informalidad en la propiedad de la tierra. Esto implica que el Estado sea quien deba destinar los recursos para fortalecer al sector agropecuario y no existan recursos para invertir por ejemplo en el mejoramiento de los bienes públicos como la ADT⁵⁹, lo cual trae consecuencias inevitables en la productividad del agua si se tiene en cuenta que parte de la ineficiencia en el uso de este recurso se debe a los inadecuados **métodos de riego** y a las fallas en la **infraestructura de los sistemas**.

Actualmente los distritos de adecuación de tierras presentan una infraestructura deteriorada o que ya no es operativa, incluso cerca del 30% de los distritos de pequeña escala no funcionan en la actualidad. En la gran mayoría de los casos, la infraestructura ya ha cumplido su vida útil y los procesos de rehabilitación que se han venido llevando a cabo han quedado inconclusos. La mayoría de canales de conducción y distribución no son revestidos, lo cual causa grandes pérdidas y fugas de agua. La maquinaria empleada es obsoleta, las tecnologías no son actualizadas, al interior de los predios la infraestructura es pobre, y en general, hay un bajo nivel de tecnificación debido a que la infraestructura intrapredial no hace parte de los proyectos de adecuación de tierras, por lo que casi siempre estas obras quedan inconclusas (CEPAL & DNP, 2014; DNP, 2016).

En términos generales, no hay procesos de innovación y desarrollo tecnológico en el tema, en parte por la descoordinación entre las entidades ejecutoras, administradoras y encargadas de CTel. Así mismo, no hay un programa de conservación de la infraestructura, por lo que no hay periodicidad en las labores de mantenimiento y conservación (CEPAL & DNP, 2014). Adicionalmente, no existen actualmente estructuras para medir y controlar el uso del agua, lo cual ha impedido el conocimiento real sobre la demanda hídrica para cada cultivo y en cada lugar en específico, por lo cual el desarrollo productivo y las decisiones en cuanto a este tema en el sector se han tomado bajo supuestos y estimativos con un alto grado de incertidumbre, que conllevan a un uso ineficiente del recurso. En este punto se trata el

⁵⁹ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en el Taller comité consultivo 1 diagnóstico y priorización

tema de la **precaria información** que se tiene en el sector. Así las cosas, aún no es posible realizar en Colombia un análisis del estado del uso del agua en el sector y en los distritos de adecuación de tierras. En este sentido, se evidencia también una inadecuada sistematización de la información con la que se cuenta, ya que no existe un sistema unificado de información en el que las instituciones compilen y reporten información detallada del sector que sirva como base para la toma de decisiones⁶⁰. En este estudio se observaron diferencias, por ejemplo, entre las bases de datos de los distritos reportadas por el SIGOT, SIPRA y ADR.

Finalmente, se considera que en términos de investigación e información, las principales fallas se dan debido a la identificación de las verdaderas **necesidades de investigación** en el país (Cuadro 5) y a la débil **transferencia de conocimiento**, que tiene que ver además con la capacitación de técnicos y la educación a productores a través de programas y proyectos; en este sentido, se destaca la importancia de crear una **cultura de formalización y pago por el uso del agua**, que además ayude a crear conciencia del uso eficiente de este recurso. Mediante el método de la encuesta Delphi, se constató que uno de los aspectos que promoverían la implementación de métodos de uso eficiente, o de métodos de reúso para aumentar la productividad del agua, sería el tener mayor consciencia sobre un posible escenario de escasez de agua.

Cuadro 5. Caso de éxito. Innovación y productividad en Estados Unidos.

Innovación en productividad del agua

Un ejemplo de cómo a nivel de las instituciones académicas se puede trabajar en el fomento de la innovación en temas de productividad del agua, es la Universidad de Nebraska, Estados Unidos, en la cual se encuentra el Instituto Robert B. Daugherty de Agua para la Alimentación. La misión de esta institución es tener un impacto duradero y significativo en el logro de más seguridad alimentaria con menos agua, mediante la investigación científica y de políticas, utilizando los resultados de la investigación para informar y asesorar a los encargados de formular políticas y educar al talento humano necesario. Adicionalmente, este Instituto trabaja para extender la experiencia de la Universidad de Nebraska a través de sólidas alianzas con otras universidades y organizaciones del sector público y privado (Lenton, 2013) (University of Nebraska foundation, 2017).

Es así como en conjunto con el Instituto Grantham para el Cambio Climático y el Medioambiente del Imperial College de Londres, lograron financiar y desarrollar con la FAO en el año 2009 el modelo y software AquaCrop y AcuaCrop-Os, buscando estimar la productividad del agua y realizar una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos para abordar los progresivos desafíos asociados con la asignación del agua y sus usos en diferentes actividades productivas. Este modelo fue evaluado por Tornés Olivera, Brown Manrique, Gómez Masjuan, & Guerrero Alega (2016) en Cuba en la simulación del crecimiento del cultivo de frijol y en Colombia fue utilizado para estimar los rendimientos del cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca (Cortés Bello, 2013) arrojando resultados de manera rápida y satisfactoria, logrando evidenciar que dichos modelos permiten realizar estudios detallados de los predios y de las fuentes donde es captada el agua, lo que permite, posteriormente, observar el rendimiento de los cultivos frente a las cantidades de agua suministradas, favoreciendo una correcta toma de decisiones que permita hacer frente de la mejor manera a los fenómenos de variabilidad y cambio climático, mediante el uso eficiente del recurso hídrico, obteniendo como resultado una mayor productividad de los cultivos.

⁶⁰ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en el Taller comité consultivo 1 diagnóstico y priorización

4.2 VERTIMIENTOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA

El uso de fertilizantes y de plaguicidas en los diferentes cultivos es uno de los principales factores que inciden en la descarga de vertimientos contaminantes del sector agrícola, la criticidad de estos vertimientos es su **naturaleza difusa**, ya que generalmente estos no son dispuestos mediante una tubería o canal específico, sino que se dispersan a través del terreno.

En el informe presentado por la FAO (2017), se presenta el cálculo de consumo de fertilizantes nitrogenados, de abono potásico y fertilizantes fosfatados por hectárea de tierras cultivables a nivel mundial entre el año 2002 y 2014 (Figura 21); estos datos evidencian que la tendencia reciente de consumo presenta un comportamiento de crecimiento exponencial, indicando un aumento promedio anual de un 2% en los consumos de fertilizantes, excepto en los años 2003, 2007 y 2010 en los que el comportamiento registrado mostró un aumento de más del 5%.

Esta situación es preocupante si se tiene en cuenta que en la mayoría de los casos **los agricultores utilizan más fertilizante del requerido por las plantas para un crecimiento óptimo**, lo cual conlleva a que el exceso de fertilizante sea transportado hacia las aguas superficiales o se infiltre hasta llegar a las aguas subterráneas, de este modo se genera un aporte de nutrientes como nitrógeno y fósforo, lo cual contribuye a los procesos de eutrofización de las fuentes de agua, provocando la afectación del medio ambiente y de las aguas que pueden ser destinadas a consumo animal, vegetal o humano (Yepis Vargas, Fundora Herrera, Pereira Marin, & Crespo Borges, 1999). Se estima que en Colombia **solo el 40 % de los productores realizan el análisis necesario para el uso de las cantidades requeridas de estos productos** (DANE, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, & SIPSA, 2012).

El exceso en el uso de fertilizantes está dado por la **falta de información e investigación** sobre temas que tienen que ver con la fertilización. Para obtener rentabilidad en los cultivos, **el uso de fertilizantes debe estar acompañado de estudios fisicoquímicos del suelo y de requerimientos del cultivo**, los cuales permiten identificar la dosis de fertilizante a usar y el plan de fertilización más apropiado en cada caso. Adicionalmente, se deben tener criterios de selección adecuados dependiendo de su concentración, ion acompañante, índice de salinidad y acidez, la compatibilidad para hacer mezclas, y finalmente, según su disponibilidad, costo y transporte (SAGARPA, 2016).

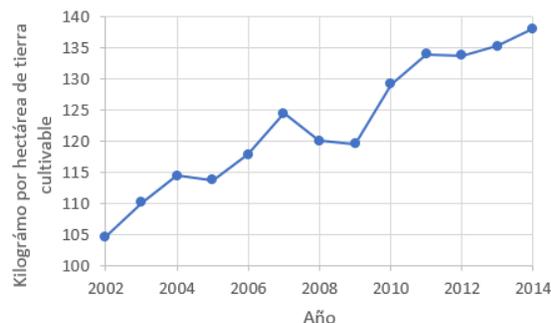


Figura 21. Consumo de Fertilizantes
Fuente: (FAO, 2017)

La contribución de los fertilizantes a la contaminación del agua está influenciada por diversos **factores como el clima, el relieve, las propiedades del suelo y las técnicas de aplicación de fertilizantes**. La

precipitación puede favorecer el lavado del fertilizante, mientras que la pendiente del terreno favorece el escurrimiento del mismo hacia los cuerpos de agua superficiales. Así mismo, la textura y la naturaleza del perfil del suelo también influyen: suelos arenosos y con bajo contenido de arcilla y materia orgánica están mejor aireados y tienen mayor infiltración, por su parte, la baja capacidad de retención de agua y nutrientes resulta en mayores pérdidas de lixiviación de N y P en suelos arcillosos. El pH también puede afectar la pérdida de nitrógeno y fósforo, por ejemplo, en suelos con pH alto se presenta una volatilización de amoníaco, mientras que en suelos con pH bajo predomina la fijación de fósforo. Por último, las técnicas de aplicación del fertilizante influyen, en la medida en que se busca mejorar la eficiencia del uso de nutrientes y controlar la pérdida de los mismos (FAO, 2013a).

A nivel continental, Asia es considerado el mayor consumidor de fertilizantes a nivel mundial seguido de América (Superintendencia de Industria y Comercio, 2013). Colombia, ocupa el primer puesto en Suramérica en consumo de fertilizante para los años 2012, 2013 y 2014 con un total de 2.104,4 Kg por hectárea de tierra cultivable, seguido por Chile y Ecuador con un total de 1.182,6 Kg y 845 Kg respectivamente (Figura 22) (FAO, 2017).

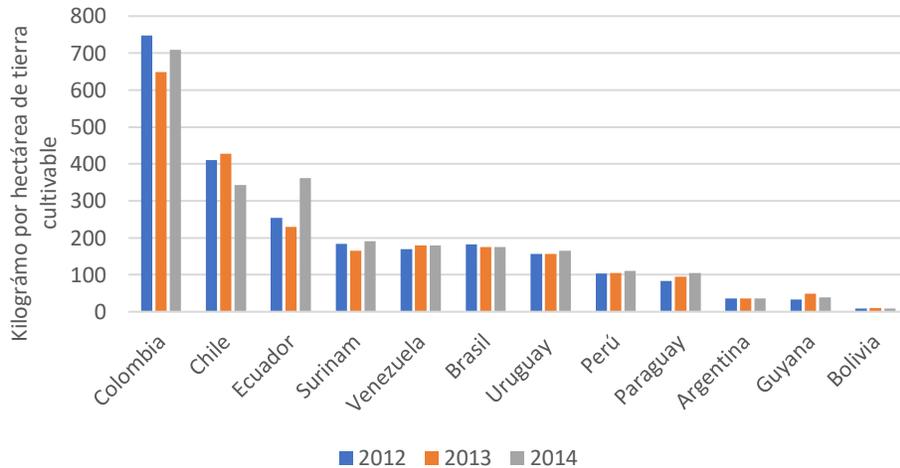


Figura 22. Consumo de Fertilizantes en Suramérica años 2012 a 2014
Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, 2017)

El alto consumo de fertilizantes nitrogenados en el ámbito mundial se debe a que el nitrógeno, junto con el fósforo y el potasio, son elementos claves para el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas, por lo que son consumidos en grandes cantidades durante todo su ciclo de cultivo. Por otra parte, existe una **generalizada deficiencia de nitrógeno en los suelos a nivel mundial**, lo que implica una dependencia directa entre el uso de estos productos y los rendimientos de los cultivos (DANE et al., 2012). Los principales fertilizantes nitrogenados sólidos que se derivan del amoníaco son la urea, el sulfato de amonio y el nitrato de amonio. En Colombia, se ha evidenciado que aproximadamente el 80% de los productores agrícolas hacen aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, de los cuales el más empleado es la urea, la cual es el fertilizante de mayor utilización a escala mundial por su alta concentración de nitrógeno (46%) y su bajo costo. El uso de estos fertilizantes se ha venido incrementando con el tiempo, registrándose en Colombia, aplicaciones de 100 kg/ha para el año 1990 y alrededor de 250 kg/ha para el 2001 (Superintendencia de Industria y Comercio, 2013).

Los fertilizantes nitrogenados generan una acidificación o alcalinización del suelo debido al aporte de minerales como S, Mg, Ca, Na y B, los cuales incrementan la actividad biológica variando la dinámica global de los nutrientes; del mismo modo, a causa de estos factores y de las impurezas de los productos se aumenta la salinidad afectando directamente al recurso hídrico (Martínez Gaspar, Ojeda Barrios, Hernández Rodríguez, Martínez Tellez, & De la O Quezada, 2011). Los fertilizantes fosfatados y potásicos son aplicados en pre siembra y dependen directamente de las características de los suelos, además de la especie y variedad de los cultivos, donde influye directamente el sistema radicular de las plantas, al igual que la producción y la calidad de la cosecha esperada. Este tipo de fertilizantes también aportan a la eutrofización de las aguas debido a la lixiviación y erosión de los suelos (Serrano Jiménez et al., 2009).

En la Figura 23 se reporta el consumo detallado de los fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos en kilogramos por hectárea de tierra cultivable para el país (FAO, 2017), donde se resalta el aumento significativo en la utilización de dichos productos para la obtención de los cultivos entre el año 2002 y 2014, pasando de 309 Kg/Ha a 708 Kg/Ha, respectivamente. Este aumento se puede asociar al incremento de los cultivos y a las necesidades de suplementación de los mismos, los cuales requieren el uso de mayores cantidades de fertilizantes con el fin de obtener su óptimo rendimiento, como es el caso de los cereales, oleaginosas, frutas, hortalizas, fibras, entre otras. Los cereales se destacan por el alto requerimiento de Nitrógeno y son los principales consumidores de fertilizantes representando aproximadamente un 51% del total; entre los cultivos que reportan la mayor cantidad de fertilizantes están el trigo, el maíz y el arroz; seguido a estos se encuentran las oleaginosas en las que resaltan los cultivos de soja y palma de aceite, las cuales requieren un elevado consumo de P_2O_5 y K_2O como se puede evidenciar en la Tabla 19 (García & González, 2015).

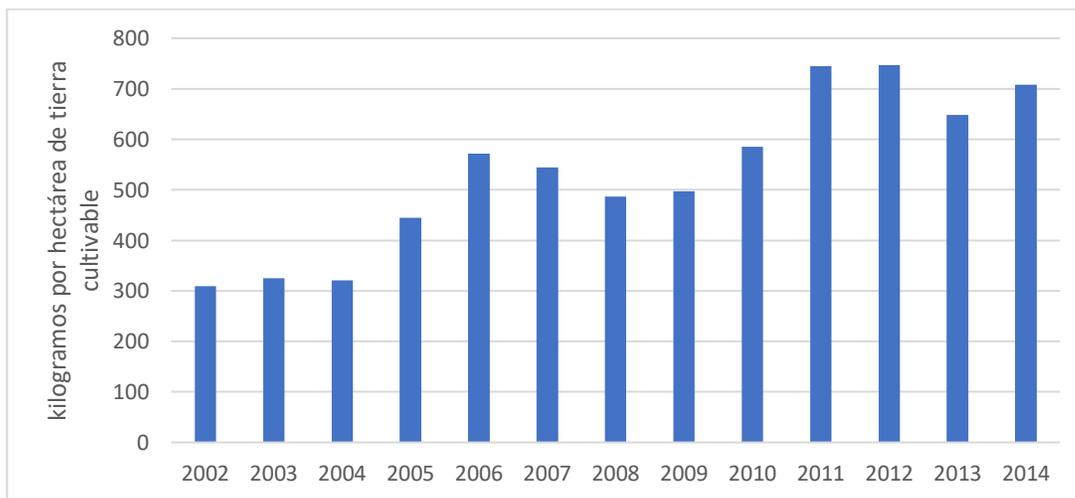


Figura 23. Consumo de Fertilizantes en Colombia
Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, 2017)

Carrera

Tabla 19. Estimaciones de cantidad y distribución de consumo de nutrientes por grupos de cultivos a nivel mundial

Cultivo	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Total	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Total
	miles ton				%			
Trigo	18,9	6,5	1,7	27,1	18	16	6	16
Arroz	16	5,2	3,5	24,7	15	13	13	14
Maíz	17,6	6,2	4,1	27,9	17	15	15	16
Otros cereales	5	1,8	1	7,8	5	4	4	5
Total Cereales	57,5	19,7	10,3	87,5	55	49	37	51
Soja	1	3,2	2,5	6,7	1	8	9	4
Palma aceitera	1,1	0,4	2	3,5	1	1	7	2
Otras oleaginosas	5,6	2,3	1	8,9	5	6	4	5
Total Oleaginosas	7,7	5,9	5,5	19,1	7	15	20	11
Fibras	4,5	1,7	0,8	7	4	4	3	4
Azucareros	3,7	1,4	2,1	7,2	4	3	8	4
Raíces/Tuberculos	2,9	1,3	1	5,2	3	3	4	3
Frutas	6,1	2,2	1,8	10,1	6	5	7	6
Hortalizas	9,5	3,8	2,8	16,1	9	9	10	9
Otros cultivos	12,5	4,5	3,2	20,2	12	11	12	12
Total	10,4	40,5	27,5	172,4	100	100	100	100

Fuente: (García & González, 2015)

Por otro lado, **el uso de plaguicidas también es un factor que influye los vertimientos provenientes de la actividad agrícola**, estos incluyen herbicidas, insecticidas, fungicidas, nematocidas y rodenticidas (FAO, 2013a). Principalmente en países en desarrollo, la contaminación del agua por fertilizantes y plaguicidas se da por la disposición inadecuada de los contenedores vacíos. En contraste con la contaminación urbana e industrial, la exportación de nutrientes y residuos de plaguicidas proviene de áreas grandes y variadas, lo que dificulta dirigir la responsabilidad y las medidas correctivas (Gerber & Menzi, 2006).

El uso de plaguicidas ha contribuido significativamente al desarrollo de la agricultura y a la producción de fibras y alimentos, sin embargo, constituye un problema ambiental por tratarse de contaminantes persistentes, con una vida media de décadas y a que pueden ser transportados largas distancias en el aire por la circulación global y a través de la escorrentía. Tres de los principales grupos de plaguicidas son tóxicos para cualquier tipo de organismo y tienen asociados efectos negativos sobre la salud: compuestos organoclorados, organofosforados y carbamatos (IDEAM, 2015a). Ciertos plaguicidas, especialmente los organoclorados, se bioacumulan en los peces y otros organismos acuáticos comestibles, provocando problemas no sólo a la biota acuática sino también a la salud humana, causados por el consumo de alimentos contaminados (FAO, 2013a). En la Figura 24 se presenta la demanda de agroquímicos por parte del sector agrícola, incluyendo fertilizantes y plaguicidas para el año 2012 en Colombia.

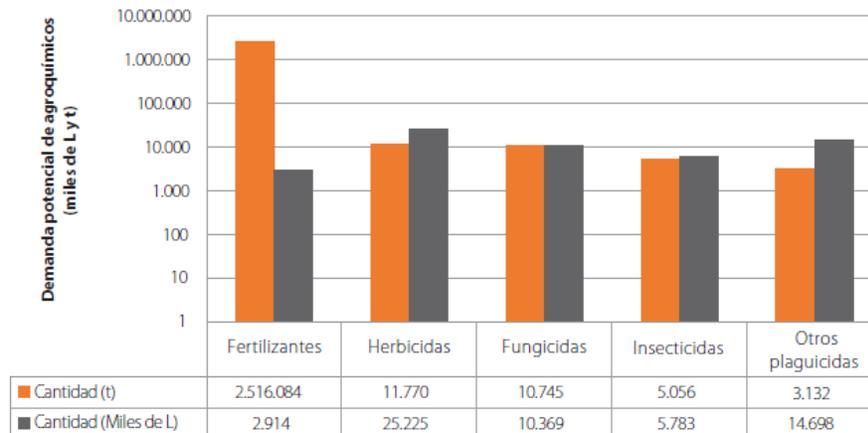


Figura 24. Demanda de agroquímicos por parte del sector agrícola en Colombia para el año 2012
Fuente: (IDEAM, 2015a)

4.3 REÚSO

A escala mundial, el principal usuario de agua de reúso es el sector agrícola. Esta práctica ha ido en aumento, convirtiéndose en una alternativa viable en regiones con escasez de agua, poblaciones urbanas crecientes con el consiguiente aumento en la demanda de alimentos y agricultura bajo riego. Se estima que el riego con agua de reúso se emplea en cerca de 50 países, en el 10% de las tierras de regadío, lo cual corresponde a aproximadamente 20 millones de hectáreas, mientras que alrededor de 525.000 hectáreas son regadas con agua de reúso con algún tipo de tratamiento (Winpenny, Heinz, & Koo-Odhima, 2013).

Según la FAO, el reúso es una de las alternativas más viables para enfrentar los problemas de escasez de agua, equilibrar la demanda y la oferta para diversos usos y mejorar la agricultura de regadío. Algunas estimaciones indican que una ciudad de aproximadamente 500 mil habitantes puede consumir cerca de 120 litros de agua y generar 48 mil m³ de aguas residuales diarias, que si fuesen tratadas apropiadamente podrían emplearse en el riego de 3.500 hectáreas a razón de 5.000 m³/Ha (FAO, 2002).

En cuanto a la calidad del agua usada en la irrigación con aguas residuales en la agricultura, esta se encuentra vinculada directamente al tipo de cultivo, si es realizada en cultivos que se consumen crudos y no son procesados posteriormente para su comercialización, como es el caso de las hortalizas frescas, donde el riego debe ser restringido por el alto peligro de contaminación. Caso contrario, cuando el riego es aplicado sobre cultivos a los que se les realiza algún tipo de procesamiento antes de ser comercializados, como es el caso de los alimentos enlatados u otros productos que no son consumidos directamente por el hombre, como los pastos, concentrados, entre otros (Silva, Torres, & Madera, 2008). Quipuzco Ushñahua (2004) menciona el uso de reservorios de estabilización ubicados a una profundidad próxima entre los 8 y 15 m para almacenamiento estacional y purificación de efluentes parcialmente tratados; estos pueden alcanzar eficiencias de remoción de detergentes, de aproximadamente 90% de DBO y entre 3 y 4 órdenes de magnitud de coliformes fecales; esta agua puede ser usada posteriormente para riego de cultivos no comestibles.

La capacidad de asimilación de nutrientes, la presencia de iones tóxicos, el consumo de agua, la concentración relativa de Na y el contenido de sales solubles son algunos de los factores primordiales

que se deben tener en cuenta para el reúso sobre algún cultivo específico; además, es posible que las condiciones climáticas ayuden a la salinización del suelo y ocasione una modificación de la composición iónica, lo que puede alterar algunas características como el desarrollo vegetativo e influir en su productividad (Silva et al., 2008). A modo de ejemplo, algunos de los cultivos como los forrajes y algunas especies arbóreas y cultivos, como el maíz, el sorgo y la cebada requieren una elevada capacidad de asimilación de nutrientes respecto a los elementos mayores N, P y K, además de un alto consumo de agua, por lo cual también influye la tolerancia a la humedad del suelo.

En el mundo, existen más de 3.300 instalaciones de regeneración de agua, con diversos grados de tratamiento y para diferentes usos; cerca de 1.800 se encuentran en Japón, 800 en Estados Unidos, 450 en Australia y cerca de 230 en la Unión Europea. Por su parte, en el Medio Oriente y en el Mediterráneo se cuenta con aproximadamente 100 plantas, en Latinoamérica 50 y en África 20 (Figura 25). En países como Francia, España, Túnez, Pakistán y Senegal, entre otros, se tienen ejemplos exitosos de reúso. En Pakistán por ejemplo, el 25% de las verduras y hortalizas cultivadas se riegan con aguas residuales de zonas urbanas, cultivadas cerca a los mercados, las cuales tienen precios más bajos frente a productos similares importados, mientras que en Senegal, específicamente en Dakar, el 60% de las verduras consumidas son cultivadas con una mezcla de agua subterránea y aguas residuales no tratadas dentro de los límites de la ciudad (WWAP, 2006).

En Túnez, entre el 30% y 40% de las aguas residuales tratadas se utilizan para el riego agrícola y de jardines. El riego agrícola se da en cerca de 8.100 ha de cultivos industriales y forrajeros, cereales, viñedos, cítricos y otros árboles frutales. Para esto, la normativa en el país es permisiva para el uso de efluentes tratados en forma secundaria para todos los cultivos, excepto para hortalizas. En este país, se espera que el volumen anual de agua regenerada llegue a los 290 millones de m³ en el año 2020, cuando sea equivalente al 18% de los recursos de aguas subterráneas y pueda utilizarse para contrarrestar la intrusión de aguas del mar en los acuíferos costeros. Otros casos exitosos de reúso de agua se muestran en el Cuadro 6.

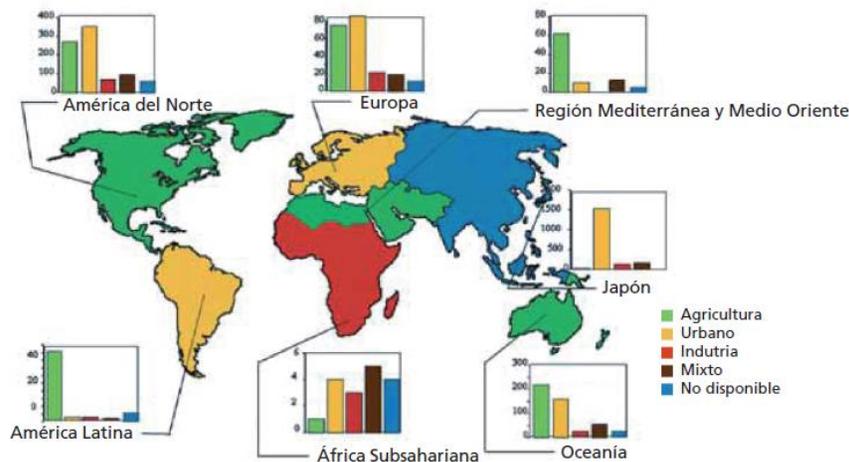


Figura 25. Sistemas de reutilización de aguas residuales en el mundo
Fuente: (Winpenny et al., 2013)

Cuadro 6. Casos de éxito. Reúso de agua en la agricultura.

Casos en Francia	Caso en España
<p>Debido al aumento del turismo, las islas francesas han venido experimentando escasez de agua. La demanda de agua es suministrada desde el continente y su costo marginal es muy alto. Como estrategia ante esta situación, se estableció un sistema de reúso de aguas residuales para el riego de cultivos, permitiendo mantener una actividad agrícola rentable. Las aguas residuales son tratadas de acuerdo al tipo de cultivo y uso. En Noirmoutier, por ejemplo, se implementó el reúso para el riego de cultivos alimentarios (Vargas, 2015). En general, los tratamientos son de tipo terciario y van acompañados de monitoreos para garantizar que la calidad cumpla con las directrices de la OMS (Brissaud, n.d.).</p> <p>Por otra parte, en el centro de Francia, caso de Clermont-Ferrand, existe un proyecto que genera un caudal de 0,115 m³/segundo que es usado para el riego de 750 ha de maíz (Vargas, 2015). El reúso de aguas resultó ser una solución económica que permitió el desarrollo de la agricultura de regadío y el aumento de los ingresos de los agricultores. El proyecto comenzó en 1996 y se implementó en ocho municipios. Las aguas residuales son tratadas mediante lagunas de estabilización y lodos activados antes de ser utilizadas para riego (Brissaud, n.d.).</p>	<p>En el Delta del Llobregat, el Delta del Tordera y en la Costa Brava, debido a la contaminación de los cuerpos de agua se han construido plantas de tratamiento de aguas residuales que incluyen tratamiento terciario, produciendo agua apta para otros usos, entre ellos el riego agrícola por parte de comunidades de agricultores que se dedican principalmente a la producción de forraje para ganado (FAO, 2013b).</p> <p>En la ciudad de Tordera, la mayor parte del agua tratada es utilizada para recargar el acuífero o es vertida al río Tordera, otra parte es usada por algunos agricultores que formaron una comunidad de regadío denominada Mas Rabassa y construyeron tuberías, una estación de extracción y un embalse para captar el efluente y poder ser utilizado para riego. El gobierno de Cataluña financió el 70% de los costos de capital del proyecto, la parte restante fue pagada por los agricultores y el proyecto comenzó a operar en el año 2007. Como resultado, se ha minimizado el impacto debido a la sobreexplotación del acuífero y ha mejorado el tratamiento de aguas residuales (Winpenny et al., 2013).</p>

En Latinoamérica cerca del 30% del agua de reúso se emplea en cultivos industriales (Tabla 20). Sin embargo, se muestra también que cultivos de consumo directo para los humanos como las hortalizas y para los animales como los forrajes tienen una alta participación en el reúso, lo cual pone en alerta sobre esta práctica en el sector. México es el país que mayor reúso presenta en la agricultura, con cerca de 370.000 ha irrigadas, seguido de Perú con 6.800 ha y Argentina con 3.700 ha (Echeverry, 2011).

Tabla 20. Principales cultivos empleados para reúso de aguas residuales domésticas en Latinoamérica

Cultivos regados con agua residual	Área (ha)	Caudal (Ls ⁻¹)
Forestales	97	99
Frutales	46,772	40
Industriales	391,418	1,473
Forrajes	6,943	1,172
Hortalizas	48,691	1,511
Otros	806	696
Total	494,727	4991

*Países incluidos: Argentina, Colombia, México, Nicaragua, Perú y República Dominicana.
Fuente: Adaptada de Cepis, 2003.

Fuente: (Silva et al., 2008)

Generalmente en los países latinoamericanos, debido a los costos y manipulación de residuos, los estatutos para el vertimiento de efluentes en los cuerpos receptores establecidos como quebradas, ríos y mares, emplean legislaciones que cumplan con un nivel secundario de seguridad. Esto quiere decir que las leyes presentan cobros y multas adicionales, de acuerdo a las caracterizaciones de los efluentes. En diferentes casos, se utiliza el proceso de desinfección como etapa final del tratamiento de los residuos; en países como México, por ejemplo, se utilizan estos efluentes para riego de jardines y en la industria de servicios sanitarios, pero con algunas restricciones de leyes internas (Silva et al., 2008).

Similarmente, en un total de 5 Ha de extensión ubicadas en Maracaibo, Venezuela, el efluente de un sistema de lagunas de estabilización fue reutilizado en el riego experimental para la producción de cultivos de ciclo corto y de frutales perennes entre los cuales se encuentran la lima persa, la guayaba, el mango y el níspero, observando que un óptimo diseño de las lagunas de estabilización y mediante la ejecución de adecuados niveles de operación y mantenimiento, los efluentes tratados por las mismas, tuvieron calidades físico-químicas y bacteriológicas que no representaban riesgos para la salud. Adicionalmente, se observó que el comportamiento de las especies irrigadas con este efluente y con agua fresca tuvo un comportamiento similar; además de lo anterior, no se presentaron problemas de sales, sodio y elementos tóxicos en el suelo donde se realizó el estudio (Trujillo et al., 1996).

Por su parte, en Colombia, la normativa es muy estricta en cuanto a las actividades permitidas para el reúso en el sector agropecuario, restringiendo el riego de cultivos para alimentos de consumo directo, así como el consumo directo de aguas residuales por animales, con el fin de asegurar las condiciones de calidad que eviten riesgos en la salud pública. Dada la importancia del reúso en este sector y de contar con una regulación clara para el manejo de aguas residuales, la OMS y la FAO han publicado guías y directrices sobre calidad del agua para el uso de aguas residuales, especialmente en la irrigación (Silva et al., 2008).

En Colombia son pocos los casos de reúso de agua en la agricultura. La FAO, en Aquastat reportó para 2010, 2.397 millones de m³ de agua residual doméstica producida y un tratamiento solo a 597 millones de m³; sin embargo, para el país no se reporta el volumen de agua empleada en reúso. Por su parte, Camacho (2017) reporta que el 90% de las aguas residuales en Colombia son vertidas sin ningún tipo de tratamiento y los pocos sistemas existentes tienen deficientes capacidades, sumado a que este no es un tema considerado prioritario para la inversión, por lo cual los recursos económicos destinados a esta actividad son limitados.

Pese a esta situación, algunos casos han sido implementados, como el reúso de agua en cultivos para la producción de biocombustibles, como de la palma de aceite y la caña de azúcar (Lasso & Ramírez, 2011). Según estos autores, el sector cañicultor ha venido implementando el reúso del agua con el fin de reducir la presión del cultivo sobre el recurso hídrico. En este sentido, esta práctica ha tenido efectos positivos tanto en la productividad en términos de tonelada por hectárea de caña de azúcar frente a la media de la región, como en incrementar el líquido de sacarosa en el jugo de caña. Adicionalmente, se ha evitado la descarga de 43 toneladas de DBO₅, 21 toneladas de SST y nueve de NH₃ (Echeverry, 2011).

Otro caso de reúso de agua para el riego en la agricultura en Colombia se encontró en el Campo Castilla de Ecopetrol en el municipio de Acacías (Meta). En este pozo petrolero, se estima que por cada barril de petróleo se obtienen cinco barriles de agua que sale mezclada, la cual es procesada para devolverle su

calidad antes de regresarla al río Guayuriba o de inyectarla en el fondo del subsuelo. En 2006, en convenio con Corpoica, se monitoreó el efecto del agua tratada sobre el ganado bovino y algunos cultivos de caña de azúcar, sorgo y otras especies forestales. Se estudiaron muestras de plantas, tejidos y suelos, así como la leche producida por tres generaciones de ganado, encontrando, después de tres años que no existía evidencia de residuos de hidrocarburos, ni en los cultivos ni en el ganado⁶¹.

Dados estos resultados, se decidió implementar un programa denominado “Área de Sostenibilidad en Agroenergía”, en el cual, existen actualmente 11 parcelas de producción de cultivos de biocombustibles y una laguna para proveer agua de consumo vital al ganado bovino y bufalino. Este programa ha permitido además una mejoría en las condiciones ecológicas en esta área⁶². En esta área actualmente se producen 120 mil barriles de petróleo al día y 680 mil barriles de agua⁶³.

⁶¹ http://www.ecopetrol.com.co/documentos/80200_Publicacion_tiempo_ecopetrol.pdf

⁶² *Ibid.*

⁶³ *Ibid.*

5 SECTOR PECUARIO

El sector pecuario es uno de los que crece con mayor rapidez en el mundo, cerca del 80% de la superficie agrícola mundial, se usa para la generación de alimento para el ganado o se encuentra dedicada directamente a una actividad ganadera (FAO, 2014). Es considerado como un renglón socioeconómico de gran importancia en el desarrollo del campo, no sólo por ser un generador de ingresos y alimentos, sino porque el ganado es reconocido como un activo valioso, especialmente para la población de las zonas rurales, donde se conserva mediante sistemas tradicionales de producción, en los que se basa parte de la economía campesina y la seguridad alimentaria familiar. Cerca del 70% de la población rural en condición de pobreza en el mundo tienen esta actividad entre sus medios de subsistencia (FAO, 2014).

A escala mundial y debido a las prácticas tradicionales en la actividad pecuaria, este sector es reconocido como uno de los principales contribuyentes a los grandes problemas ambientales, tales como el cambio climático, degradación del suelo, escasez y contaminación del agua (Steinfeld et al., 2006). Así mismo, es uno de los principales sectores afectados por la escasez y la contaminación de este recurso; según Tapasco et al., (2015), durante el Fenómeno de La Niña de 2010-2011, en Colombia se desplazaron cerca 1,6 millones de cabezas de ganado, mientras que la muerte de animales ascendió a más de 10 mil cabezas.

El alto consumo de agua en este sector se asocia a la producción de pastos, es decir, al riego empleado en cultivos de pastos de corte y forraje y adicionalmente al agua verde consumida por las grandes extensiones de pastos para ganadería extensiva. No obstante, en esta consultoría, los pastos de corte y forraje son considerados cultivos agrícolas, por lo cual fueron priorizados en el sector agrícola, mientras que se considera que a los pastos para ganadería extensiva (pastos naturales, sistemas silvopastoriles y pastos mejorados⁶⁴) no se les suministra riego, al igual que para los cultivos, se considera que en el volumen de agua verde no existen pérdidas.

La actividad pecuaria en Colombia incluye la cría, levante y/o engorde de animales de especies como bovinos, porcinos, bufalinos, equinos, ovejas, cabras, aves y peces (Tabla 21). Para el caso específico de este estudio, se realizó una priorización teniendo en cuenta criterios como la disponibilidad de información, criterios económicos y la representatividad en el territorio. Los subsectores priorizados fueron el bovino, porcino y avícola. En cuanto a producción, la carne de cerdo lidera la lista de producción en el mundo con un 42%, seguida de la carne de pollo con un 35,1% y la carne bovina con 3% (DANE, 2012). Estos tres tipos de actividad pecuaria además presentan el mayor número de animales en el inventario pecuario nacional y corresponden a las actividades que mayor aporte realizan al PIB. En cuanto a la distribución territorial, en Colombia, la actividad ganadera se da en el 34% del área nacional, que corresponden a aproximadamente 39 millones de hectáreas en pastos y herbazales, lo cual contrasta con la vocación ganadera del suelo de 15 millones de hectáreas, correspondientes al 13,3% del territorio nacional⁶⁵. Otras consideraciones adicionales sobre los criterios de priorización se describen para los subsectores priorizados en la Tabla 22.

⁶⁴ Clasificación realizada por ENA 2014, con base en los datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

⁶⁵ Presentación institucional (UPRA, 2014)

Tabla 21. Inventario pecuario nacional

Tipo de ganado	Número de cabezas	
	Censo Nacional Agropecuario - CNA 2014 (DANE, 2016)	Censo Pecuario Nacional - CPN 2016 (ICA, 2016)
Bovinos	21.502.811	22.689.420
Porcino	5.001.978	5.004.836 ⁶⁶
Aves	720.368.173	797.099.156 (FENAVI, 2016) ⁶⁷
Bufalino	175.492	248.893
Equino	1.211.889	1.451.085
Ovejas	777.513	1.423.274
Cabras	753.778	-
Otras especies	4.011.917	-

Fuente: (DANE, 2016; ICA, 2016)

Tabla 22. Características de las actividades priorizadas en el sector pecuario

Actividad	Características
Bovinos	<p>Esta actividad contribuye con el 1,6% del PIB nacional, al 20% del PIB agropecuario y 53% del PIB pecuario. En Colombia, el consumo per cápita de carne y leche es de 21 kg y 140 litros al año respectivamente. Las exportaciones de este subsector ascienden a USD 330 mil (Tapasco et al., 2015). Según el último CNA (DANE, 2016) y el CPN (ICA, 2016) la población bovina, se encuentra principalmente en Antioquia, Córdoba, Casanare y Meta. Los principales sistemas de producción bovina en Colombia corresponden a ganadería en pastizales, ganadería confinada (estabulada – semiestabulada) y el sistema de producción mixta (DANE, 2012).</p> <p>Esta producción, se clasifica según los productos finales en carne, leche y doble propósito. El hatillo de carne cuenta con aproximadamente el 59% de las cabezas de ganado, el doble propósito tiene cerca del 35% y la lechería especializada corresponde al 6% (Tapasco et al., 2015).</p>
Porcinos	<p>Esta actividad es una de las más tradicionales y con mayor producción en el mundo, tiene periodos cortos de gestación y bajos costos de producción, lo cual la hace muy llamativa (Asociación Colombiana de Porcicultores, 2014). En Colombia, tiene dos escalas muy diferenciadas: la producción industrial y muy especializada y, la de pequeña escala y a manera de subsistencia en la economía campesina. Los departamentos con mayor población son Antioquia, Cundinamarca y Valle del Cauca (ICA, 2016). En este subsector es necesaria la producción de volumen para que la actividad sea rentable, por lo que la porcicultura a escala campesina se considera poco rentable (Sociedad de Agricultores de Colombia - SAC, 2002).</p> <p>Las tendencias en el consumo de carne de cerdo en Colombia han mostrado un incremento en los últimos años. En 2009 el consumo de carne de cerdo per cápita reportado fue de 4,2 kg/año, en 2015 fue de 7,4 Kg/año, mientras que en 2016 este consumo aumentó a 8,6 kg per cápita/año (Asociación Colombiana de Porcicultores, 2014).</p>
Avícola	<p>El subsector avícola se ha constituido en uno de los más importantes en la economía nacional. El PIB avícola representa el 0,23% del PIB nacional y cerca del 3,49% del PIB agropecuario. En 2015, el crecimiento de este subsector, hizo que ocupara el segundo lugar dentro de las actividades agropecuarias en Colombia. Según el número de animales, la producción avícola puede</p>

⁶⁶ El inventario porcino nacional del Censo Pecuario Nacional (ICA, 2016) es de 5.094.664 animales, sin embargo el dato reportado en este estudio es de 5.004.836, las diferencias se encontraron en un error de operación en la base de datos del CPN, en donde para el departamento de Cauca, se reportó una suma de cerdos en traspasío y en producción industrializada de 192.122 animales, pero se verificó que esta suma realmente corresponde a 102.294 animales.

⁶⁷ El inventario de aves nacional reportado por ICA (2016) corresponde a 157.135.371 animales, el cual tiene diferencias significativas en lo reportado por DANE (2014) de 720.368.173 animales, esto indicaría una reducción del 78% en el inventario total nacional entre estos dos años. Sin embargo, se realizó una verificación con la base de datos de producción de FENAVI, encontrando que para el encasamiento de pollitos y pollitas al año 2016 se reporta un total de 797.099.156 animales, estos resultados indican un error en los datos del ICA (http://www.fenavi.org/index.php?option=com_content&view=article&id=2472&Itemid=1330).

Actividad	Características
	<p>clasificarse en traspatio (menos de 200 animales) y confinamiento (más de 200 animales). La primera de ellas se refiere a la producción principalmente campesina, que se realiza alrededor de la vivienda rural y con fin de proveer de alimentos básicos al hogar, la segunda corresponde a una producción más tecnificada y se caracteriza por la permanencia de los animales dentro de una estructura que limita su movimiento (DANE, 2016). Actualmente, la mayor población avícola se encuentra en los municipios de Santander, Cundinamarca y Valle del Cauca (ICA, 2016). Este subsector puede considerarse como altamente tecnificado y exigente en el control de aspectos genéticos, nutricionales, sanitarios y ambientales. Sin embargo, se reconocen impactos como la contaminación del agua debido al vertimiento de aguas residuales proveniente de granjas (FENAVI, 2014).</p>

Fuente: Elaboración propia

5.1 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD

El uso del agua para beber y servir a los animales es la demanda de agua más alta relacionada con la producción pecuaria y representa el 0,6% del consumo de agua dulce a nivel mundial (FAO, 2006b). El agua representa 60 a 70% del peso corporal y es esencial para los animales en su funcionamiento fisiológico vital; la cantidad de agua requerida por un animal estará determinada por la cantidad necesaria para mantener su balance corporal. Los animales para producción pecuaria satisfacen sus necesidades de agua a través de agua potable, el agua contenida en los piensos y el agua metabólica producida por la oxidación de los nutrientes y pueden perderla a través de la respiración, la evaporación, la defecación y la micción (FAO, 2006b). Especialmente en granjas industrializadas, la actividad pecuaria también requiere agua de servicio, para limpiar las unidades de producción, lavar los animales, enfriar las instalaciones y productos, así mismo para la eliminación de desechos.

En el ENA 2014, se estimó la demanda para el sector pecuario en Colombia en 2.643,68 millones de m³ para el año 2012. Esta demanda incluye además del consumo vital de los animales y el agua de servicios, la demanda para las actividades de sacrificio, que en este estudio son consideradas en el sector industrial. Según los estimativos realizados por IDEAM (2015), la demanda de agua del sacrificio es de 1.206,09 millones de m³/año, de los cuales el 71% corresponde al sacrificio de bovinos, el 28% al de porcinos y el 1% al de las aves. La demanda asociada al sacrificio no se incluye en el análisis realizado para el sector pecuario en esta consultoría, por lo cual, la demanda para el sector pecuario es de 1.437,59 millones de metros cúbicos.

La Figura 26 representa en general, el uso del agua en el sector pecuario. En este sistema, el volumen de agua de entrada puede ser tomado de acueductos o directamente de fuentes superficiales o subterráneas. El uso no consuntivo del agua en la actividad pecuaria constituye el volumen de salida, el cual en el caso de la ganadería confinada podría ser destinada a reúso, debido a que podría existir recolección de aguas residuales (**agua excedente de actividades de limpieza y excretas**), sin embargo, en **ganadería bajo pastoreo el vertimiento de agua es difuso, el cual puede darse en forma de escorrentía directa o directamente al suelo**. No se consideran otras fuentes de entrada, como agua de lluvia, agua de reúso o agua de recirculación, debido a que estas opciones se encuentran restringidas por la normatividad pecuaria y de reúso actual en Colombia (ver numeral 5.3).

Carrera

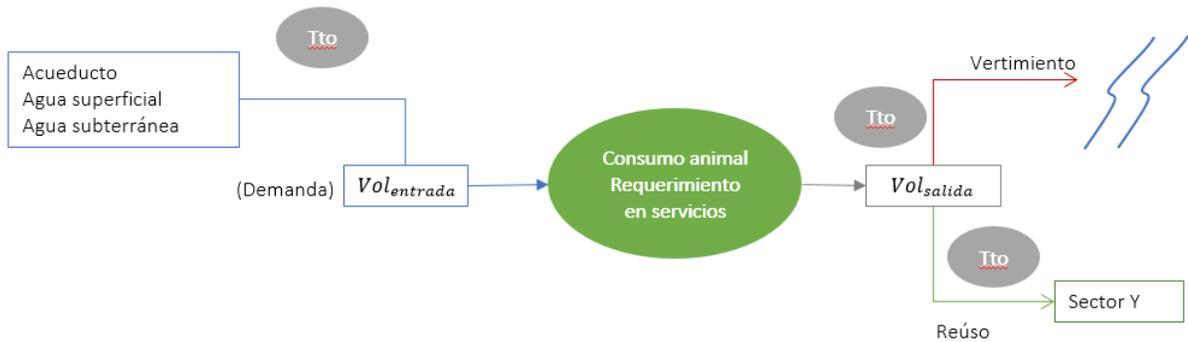


Figura 26. Esquema general de uso del agua en el sector pecuario
Fuente: Elaboración propia

La eficiencia en el uso del agua del sector pecuario se calcula con la Ecuación 11. Esta se define como el volumen de agua necesario para satisfacer la demanda pecuaria en relación con el agua extraída para la actividad, la cual considera el uso consuntivo y el no consuntivo.

Ecuación 9. Eficiencia sector pecuario

$$Eficiencia = \frac{Demanda\ pecuaria}{Agua\ extraída} * 100$$

El volumen de agua extraída considera el caudal concesionado a cada actividad pecuaria, el cual hasta la fecha no ha sido posible obtener, debido a que **no se cuenta con datos específicos sobre cuál es el porcentaje de usuarios del sector pecuario que cuentan con conexión a acueducto y cuál es el porcentaje que cuentan con concesión de aguas⁶⁸**, lo cual constituye una limitación de información importante para el análisis de la demanda hídrica sector.

Si bien se cuenta con los datos sobre concesiones de agua para las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) en Colombia, esta información no es adecuada para obtener los volúmenes de agua asociados al sector pecuario, en parte porque no se cuenta con el detalle del tipo de uso al que es destinada cada concesión al interior del establecimiento (las empresas pecuarias por lo general solicitan las concesiones para uso doméstico, industrial y pecuario) o porque no todos los usuarios pecuarios pagan tasa por utilización del agua (TUA), se estima que cerca del 80% de los productores en el sector son pequeños y no tienen concesión de agua⁶⁹.

El RUA, es un instrumento de captura de información sobre el Uso de Recursos Naturales Renovables y que debe ser diligenciado por los establecimientos industriales manufactureros⁷⁰, sin embargo, al revisar esta base de datos del año 2016, se encontraron 14 registros que reportaron uso pecuario, no obstante, corresponden a establecimientos industriales (Tabla 23), además se encontró que, la actividad desarrollada por la industria (clasificación CIIU), no corresponde con actividades pecuarias, lo cual se resalta en la Tabla 23. Adicionalmente, en estos registros con uso pecuario se encontraron algunas

⁶⁸ Los cuales deben registrarse según lo estipulado en la normativa para los usuarios del recurso hídrico, Decreto-Ley 2811 de 1974, Decreto 1541 de 1978 y Decreto 3930 de 2010 y deben asegurar la potabilización del agua según las normas de sanidad e inocuidad para cada tipo de actividad.

⁶⁹ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en Taller de diagnóstico y priorización

⁷⁰ Industrias manufactureras cuya actividad productiva principal se clasifique en la sección C, divisiones 10 a 33 (clase 1011 a 3320) de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme – CIIU Rev. 4.0 A.C., adaptada para Colombia por el DANE

inconsistencias, por ejemplo, los volúmenes vertidos en algunos casos son mayores a los extraídos. A manera de ejemplo, se presentan dos casos en los departamentos de Antioquia y Cundinamarca. En el primero de ellos se hace referencia a una empresa con código CIIU 1011, la cual presenta un volumen de agua extraído de 269.110 m³ y un volumen vertido de 283.046 m³. La segunda, tiene código CIIU 1040 y reporta un volumen extraído de 3.788 m³, con un vertimiento de 755.832 m³. Estas inconsistencias podrían indicar ingreso de agua de otras fuentes que no se encuentran contabilizadas en la concesión, por lo cual no es posible emplear estos datos para encontrar eficiencias. Esta situación será tratada en el sector Industrial.

Tabla 23. Clasificación CIIU de los establecimientos industriales manufactureros que reportan un uso de agua pecuario en el RUA 2016

Código CIIU	Descripción
1011	Procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos
1030	Elaboración de aceites y grasas de origen vegetal y animal
1040	Elaboración de productos lácteos
	Elaboración de productos de molinería, almidones y productos derivados del almidón
1089	Elaboración de otros productos alimenticios n.c.p.
2022	Fabricación de pinturas, barnices y revestimientos similares, tintas para impresión y masillas
2392	Fabricación de materiales de arcilla para la construcción
2394	Fabricación de cemento, cal y yeso
2819	Fabricación de otros tipos de maquinaria y equipo de uso general n.c.p.
	Fabricación de maquinaria y equipo de uso especial

Dadas las dificultades para obtener el volumen de agua extraída en el sector, **no es posible calcular la eficiencia en el uso del agua, lo cual se constituye en un limitante para la toma de decisiones y para la gestión del recurso hídrico en la actividad pecuaria.** Sin embargo, con base en el inventario pecuario y mediante módulos de consumo se pueden llegar a hacer estimaciones del agua demandada en las actividades priorizadas. Así mismo, para suplir esta deficiencia el ENA 2014 considera un factor de pérdidas para el sector del 40%, el mismo considerado en el ENA 2010.

5.1.1 CONSUMO VITAL DE AGUA PARA LOS ANIMALES

Una gama amplia de factores interrelacionados influye en las necesidades de agua de los animales. Entre ellos se encuentra la **especie animal, condición fisiológica, nivel de ingesta de materia seca y tipo de dieta.** Así mismo, factores como la **disponibilidad, calidad y temperatura del agua, temperatura ambiente y el sistema de producción influyen en este requerimiento** (Duarte, 2011). Así las cosas, los requerimientos de agua por animal pueden ser altos, especialmente para animales altamente productivos en condiciones cálidas y secas, esto debido al aumento en las pérdidas por respiración, evaporación y defecación bajo estas condiciones (Duarte, 2011). Por esta razón, la selección de animales adaptados a las condiciones de las tierras secas puede reducir la necesidad de agua, sin embargo, la domesticación y la cría para la productividad pueden hacer del ganado más dependiente del agua potable y menos capaz de soportar dichas condiciones (Peden et al., 2007).

Para el caso de los bovinos se estima que un animal adulto puede consumir entre el 8 y 10% de su peso en agua y que este **requerimiento varía sensiblemente con las condiciones ambientales y con la edad**, así por ejemplo un toro adulto en época seca puede consumir entre 50 a 60 litros/día, mientras que en época de lluvia este consumo puede reducirse al 50%. Por otro lado, las hembras preñadas consumen más agua que las vacías y las lactantes más que las secas. Entre los bovinos, las vacas lecheras son las

mayores consumidoras de agua, las cuales pueden consumir entre 35 y 110 litros/día. Así mismo, se estima que el ganado de carne requiere 3 litros/día por cada kilogramo de materia seca consumida, este requerimiento puede aumentar entre un 30% y 60% en meses calurosos⁷¹. Estos requerimientos de agua han sido desarrollados bajo diferentes ecuaciones como la de Murphy (1992), en la cual se integran diversos parámetros animales, ambientales y productivos (Ecuación 10) (Martinez & Sanchez, 2007).

Ecuación 10. Consumo de agua libre

$$\text{Consumo de agua libre} = 15,99 + (1,58 \text{ IMS}) + (0,9 \text{ PL}) + (0,05 \text{ C.Na}) + (1,2 \text{ T})$$

Donde:

IMS = ingesta de materia seca en kg/día

PL = producción de leche en kg/día

C.Na = consumo de sodio en gr/día.

T = temperatura mínima diaria en grados centígrados

Para el subsector avícola, se estima que la demanda promedio de un pollo de engorde es de 0,35 litros/día, mientras que una ponedora puede consumir 0,25 litros/día (IDEAM, 2015a). Para los porcinos, el consumo puede variar entre 0,16 a 0,28 litros por kilogramo de peso vivo, incluyendo **el desperdicio de agua, el cual se ha estimado entre el 45% al 60% del consumo de agua por granja**⁷². La Sociedad de Agricultores de Colombia - SAC (2002), presenta algunos valores de consumo de agua vital para el subsector porcícola, estos tienen en cuenta un factor de desperdicio debido al método de suministro de agua, mas no incluyen las pérdidas por fugas en la conducción y distribución de agua en las granjas o daños en los bebederos. La FAO ha estimado algunos factores para los requerimientos de agua para el ganado de acuerdo con la temperatura ambiente (Tabla 24). Se puede observar que, para bovinos, porcinos y aves, a medida que aumenta la temperatura, los requerimientos de agua son mayores y también difieren dentro de cada tipo de especie.

Con base en los factores que se muestran en la Tabla 25 y con el fin de tener una idea sobre el consumo vital de animales, se calculó la demanda para el inventario pecuario a 2016. Los resultados encontrados deben ser considerados como referentes generales, teniendo en cuenta la imposibilidad de contar con el inventario exacto de bovinos en producción extensiva o intensiva y la alta influencia del tipo de producción pecuaria en los consumos de agua. Se encontró que el consumo de agua vital para el inventario pecuario total en Colombia para 2016 es de 696,52 millones de m³ (Figura 28). Las mayores demandas de agua para consumo animal se encuentran en los departamentos de Antioquia, Santander, Cundinamarca, Córdoba, Casanare y Meta (Figura 27).

Tabla 24. Requerimientos de agua para el ganado en relación a la temperatura ambiente

Especies	Condición fisiológica	Peso medio (kg)	Temperatura del aire (°C)		
			15	25	35
			Necesidad de agua (litros/animal/día)		
Bovinos	Sistema pastoral africano - lactancia - 2 litros leche/día	200	21,8	25,0	28,7
	Razas grandes - Vacas secas - 279 días de gestación	680	44,1	73,2	102,3

⁷¹ Información suministrada por FEDEGAN para ENA 2014

⁷² Información suministrada por PORCICOL para ENA 2014

Especies	Condición fisiológica	Peso medio (kg)	Temperatura del aire (°C)		
			15	25	35
			Necesidad de agua (litros/animal/día)		
	Razas grandes - Mitad lactancia - 35 litros leche/día	680	102,8	114,8	126,8
Aves	Pollo de asar adulto (100 animales)		17,7	33,1	62,0
	Ponedoras (100 animales)		13,2	25,8	50,5
Cerdos	Lactantes - ganancia de peso diaria del cerdo 200g	175	17,2	28,3	46,7
Cabras	Lactantes -0,2 litros leche/día	27	7,6	9,6	11,9
Ovejas	Lactantes -0,4 litros leche/día	36	8,7	12,9	20,1
Camellos	Mitad lactancia - 4,5 litros leche/día	350	31,5	41,8	52,2

Fuente: (FAO, 2006b)

Tabla 25. Consumo de agua vital por subsectores

Subsector	Clasificación del animal	Consumo agua (litros/cabeza/día) *	Fuente	Consumo agua (litros/cabeza/día) **
Bovinos	Machos y hembras de 0 a 12 meses	20-30	ENA 2010 (IDEAM, 2010) ENA 2014 (IDEAM, 2015)	25
	Machos y hembras de 12 a 24 meses	45		45
	Machos y hembras de 24 a 36 meses	80-110		95
	Machos y hembras mayores de 36 meses	80-115		97,5
Porcinos	Lechones 1-60 días	0,2-1,0	Guía ambiental para el subsector porcícola (Sociedad de Agricultores de Colombia - SAC, 2002)	0,6
	Levante 61 - 120 días	4-6		5
	Ceba 121 - 180 días	6-9		8
	Hembras reemplazo 120 - 240 días	15-20		18
	Hembras cría >240 días	15-20		18
	Machos reproductores / reemplazo >180 días	12-20		16
	Cerdos de traspatio 2016	6-9		8
Aves	Pollo de engorde	0,35	ENA 2014 (IDEAM, 2015)	0,35

*Valores encontrados en la literatura

**Valores empleados en el cálculo de la demanda pecuaria. Corresponde a un promedio de los rangos encontrados en la literatura y al valor puntual cuando es del caso.

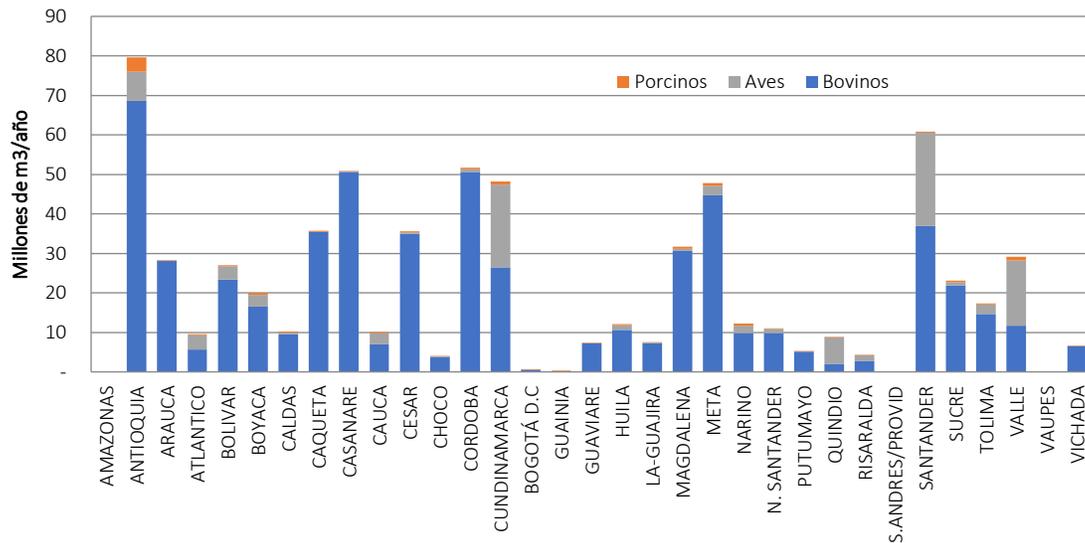


Figura 27. Consumo de agua vital por departamentos para el inventario pecuario al 2016
Fuente: Elaboración propia a partir de (FENAVI, 2016; ICA, 2016)

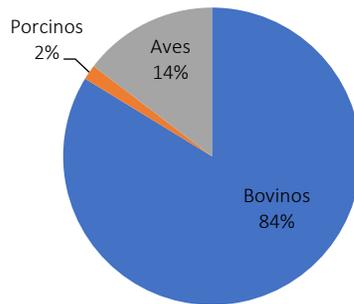


Figura 28. Distribución del consumo de agua vital por el inventario pecuario al 2016
Fuente: Elaboración propia a partir de (FENAVI, 2016; ICA, 2016)

5.1.2 CONSUMO DE AGUA EN SERVICIOS

La demanda de agua de servicio en los lugares de alojamiento **varía dependiendo de aspectos como el clima, tipo de producción, de infraestructura y uso de tecnologías.** La producción intensiva tiene requerimientos adicionales de agua de servicio para instalaciones de refrigeración y limpieza. En el caso de los cerdos que se mantienen en sistemas de lavado, los requerimientos de agua de servicios pueden ser mucho más altos que los de agua para beber (FAO, 2006b).

Las principales pérdidas que se dan en el agua de servicios son debidas principalmente a faltas tecnológicas como la **ausencia de dispositivos de cierre automáticos de las mangueras de lavado, fugas en las tuberías de conducción, uso de equipos de alto caudal para el lavado de instalaciones, falta de barrido en seco, ausencia de programas de mantenimiento y poca vigilancia y seguimiento** (FENAVI, n.d.)⁷³, por lo que mejoras en estos aspectos implican mejora en la eficiencia en el uso del agua, tal como se muestra en el Cuadro 7.

⁷³ http://www.fenavi.org/index.php?option=com_content&view=article&id=3417&Itemid=1436

Cuadro 7. Caso de éxito. Aumento de la eficiencia y productividad del agua en el subsector porcícola.

Caso granja porcícola INCAFOS (CNPML, 2002)

La Granja Porcícola INCAFOS es una microempresa, con una producción promedio de 200 cerdos mensuales. Anteriormente el estiércol en los sitios de levante era lavado con mangueras, sin ningún tipo de control y con un alto consumo de agua. Para reducir el consumo de agua, actualmente, el estiércol se retira mediante raspado en seco, disminuyendo así la duración y la frecuencia de lavado. Con las medidas implementadas hubo una disminución del consumo de agua de 310 m³/mes a 154 m³/mes.

De acuerdo con la información reportada por la empresa, no se requirió una inversión monetaria para implementar las buenas prácticas de aseo y el ahorro anual fue de 500 dólares debido a la reducción en el consumo de agua, además se redujo la carga contaminante de los vertimientos.

Los valores encontrados para los subsectores priorizados sobre **el consumo de agua en servicios presentan diferencias significativas para cada raza animal y según las fuentes de información consultadas, impidiendo la unificación de criterios** (Tabla 26). En primer lugar, según los valores de FAO (2006) se observa la importancia del tipo de producción en la estimación de este consumo, sin embargo, los estimados para las versiones del ENA no tienen en cuenta este factor, asignando el mismo valor al inventario en confinamiento como al que se encuentra bajo pastoreo o traspatio. En este sentido, el valor asignado a los bovinos de 40 litros/cabeza/día es muy superior al que se reporta en la FAO y aunque **no se conoce el número de animales que se encuentran en cada uno de los tipos de producción**, podría sobreestimarse significativamente este consumo. Se plantea la necesidad de conocer con certeza el porcentaje de animales en sistemas intensivos y extensivos, con el fin de poder ajustar los módulos de consumo.

Adicionalmente, en los datos suministrados por la Asociación Colombiana de Porcicultores (Porcicol) para el ENA 2014 y en el ENA 2010 no se puede diferenciar por edad o tipo de animal el consumo de agua en servicios para porcinos, los cuales tienen diferencias significativas con respecto a lo reportado por la FAO. Por ejemplo, para cerdos en lactación se observa que la FAO estima que el consumo en servicios es al menos 14 veces mayor.

Tabla 26. Módulos de consumo de agua en servicios según diferentes fuentes de información

Subsector	Consumo de agua en servicios (Litros/cabeza/día)				
	ENA 2010	ENA 2014	FAO	Industrial	Pastoreo
Bovinos	40	40	Terneros	0-2	0
			Adultos	11	5
			Lecheras	22	5
Porcinos	10	6-16 ⁷⁴	Lechón	5	0
			Adulto	50	25
			Lactación	125	25
Aves (pollos de engorde)	20	0,346	Pollitos	0,01	0,01
			Adultos	0,09	0,09

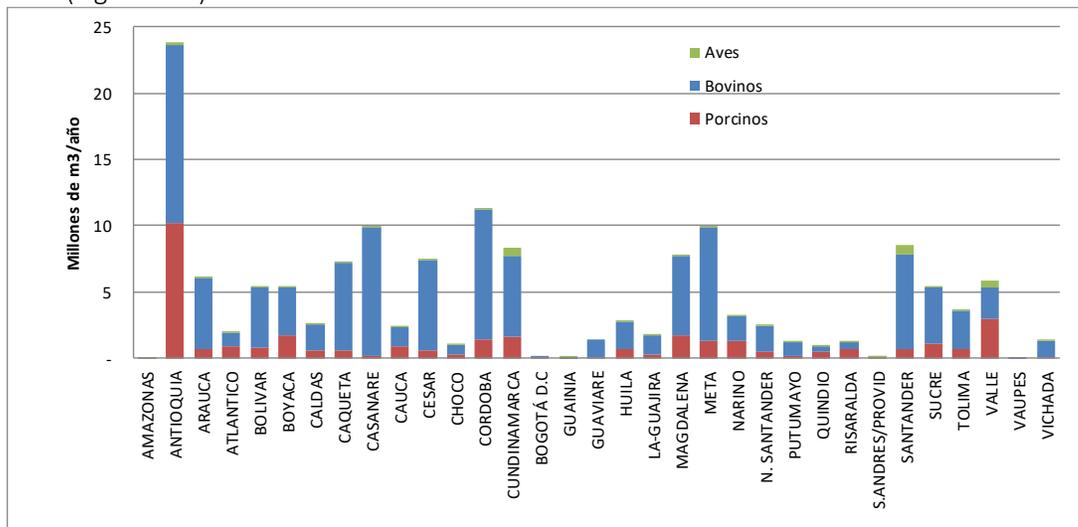
Fuente: elaboración propia a partir de (FAO, 2006b; IDEAM, 2010a, 2015a).

⁷⁴ Información suministrada por PORCICOL para ENA 2014. Según (DANE, 2013c) estos datos corresponden a la disponibilidad de agua fresca para beber que debe existir en el establecimiento y no al consumo de agua en servicios.

Según el estudio realizado por (Chao Espinosa, Sosas Caceres, & Díaz Capdesuñer, 2012) en Cuba, se identificó que las mayores pérdidas de agua de servicios se dan por deterioro de los sistemas de conducción, específicamente en el transporte del agua entre el sitio de la extracción y los lugares de almacenamiento, evidenciando que a mayor distancia existen mayores pérdidas. Se calculó que el agua gastada por día y por animal es de 26 litros y que el mayor tiempo de consumo se da en las labores de limpieza de las naves y del lavado de los animales, por lo cual la cantidad gastada también depende directamente del número de animales y del peso de los mismos. Este consumo, además, es altamente dependiente de la conciencia ambiental de los dueños y de los trabajadores que realizan estas actividades, ya que en muchas de las granjas los sistemas de lavado de los corrales y de los animales son realizados diariamente y de manera manual, sin medir el consumo y mediante sistemas de agua a presión presentando altas tasas de consumo. Así mismo, factores como el estado de los corrales influyen directamente en la cantidad de agua requerida para su lavado, cuando estos se encuentran con un mayor desgaste o los materiales de la misma son porosos y presentan una alta cantidad de grietas, el consumo de agua es considerablemente mayor

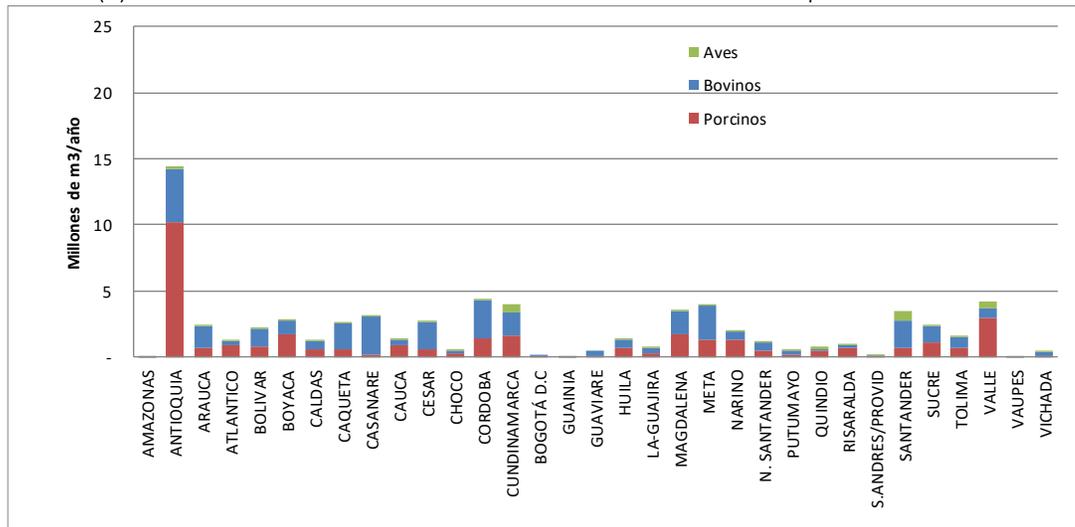
En esta consultoría se estimó para el inventario pecuario a 2016 el consumo de agua en servicios con base en los datos de la FAO⁷⁵, adaptándolos a las categorías con las que se cuenta en los inventarios nacionales. Debido a la imposibilidad de distribuir los bovinos en sistema intensivo y pastoreo se realizaron dos estimaciones, la primera considera todo el inventario bovino en un sistema intensivo, encontrando una demanda hídrica en servicios de 114,57 millones de m³, que corresponden al 76% de la demanda hídrica en servicios total pecuaria (150,74 millones de m³), el 22% corresponde a porcinos y el 2% a aves (Figura 29a).

La segunda estimación considera todo el inventario bovino en un sistema extensivo. Así las cosas, la demanda hídrica en servicios de los bovinos es de 33,79 millones de m³, es decir, el 30% de la demanda estimada si se considera el total de los bovinos en confinamiento. Así las cosas, la demanda hídrica en servicios es de 69,97 millones de m³, de los cuales el 48% corresponde a bovinos, 48% a porcinos y 4% a aves (Figura 29b).



⁷⁵ Bovinos: 2 Litros/cabeza/día para los terneros y 16,5 Litros/cabeza/día para adultos y lecheras. Porcinos: 5 Litros/cabeza/día para lechones, levante y ceba; 50 Litros/cabeza/día para hembras remplazo y reproductores; 125 Litros/cabeza/día para hembras cría y 25 Litros/cabeza/día para traspatio. Aves: 0,01 Litros/cabeza/día.

(a) Estimaciones considerando todo el inventario bovino en producción intensiva



(b) Estimaciones considerando todo el inventario bovino como en pastoreo

Figura 29. Aproximación al consumo de agua en servicios por departamento para el sector pecuario, según inventario al 2016

Fuente: Elaboración propia a partir de (FENAVI, 2016; FAO, 2006; ICA, 2016)

5.1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS PROBLEMAS DE EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

Se ha mencionado cómo el consumo de agua depende en gran medida de las condiciones fisiológicas del animal, las condiciones climáticas y el tipo de sistema de producción, por lo cual la **diversidad del sector pecuario** es uno de los principales factores que se debe tener en cuenta en la eficiencia y productividad del agua.

En Colombia, la producción pecuaria puede darse a nivel familiar, de pequeños, medianos y grandes productores. Los pequeños productores representan una importante proporción del sector, por ejemplo, para Antioquia (departamento con mayores demandas de agua pecuarias) se estima que cerca del 80% de los productores son pequeños y que no se encuentran en modelos asociativos⁷⁶. Estos modelos individuales resultan ser menos productivos y menos eficientes en el uso del agua, debido principalmente a la dificultad de acceso a mercados, a costos de transacción más altos y a producciones menos tecnificadas. Por su parte, los medianos y grandes productores tienen **procesos más tecnificados**, por lo que las demandas de agua asociadas a los consumos vitales pueden llegar a ser menores y por tanto obtener mayores eficiencias en el uso del agua.

El clima y la variabilidad climática es uno de los factores que inciden directamente en la eficiencia y productividad el agua. Es así como algunos eventos como olas de calor e inundaciones pueden provocar estrés en los animales y por esto podría afectarse la producción y la calidad de la carne y la leche (FONADE & IDEAM, 2013). En Colombia, el Fenómeno de El Niño ha afectado al sector pecuario con la muerte de bovinos y las dificultades para la alimentación del ganado (FONADE & IDEAM, 2013). Esto indica, además, que tal como se describió para el sector agrícola, este sector debe ser uno de los

76 Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en Taller de diagnóstico y priorización

primeros en adaptarse al **cambio y la variabilidad climática, lo cual implicaría un proceso de ordenamiento territorial, productivo y ambiental articulado.**

Por otro lado, la temperatura ambiente influye ya que a temperaturas más bajas el consumo de agua por animal es menor que a temperaturas mayores (Peden et al., 2007). En este sentido, el **acceso a sombras** podría considerarse un factor a tener en cuenta para mejorar la productividad y eficiencia del agua en el modelo de producción extensiva. Se destacan los **sistemas silvopastoriles** como un modelo exitoso⁷⁷, que puede ir de la mano de **instrumentos económicos** que incentiven este tipo de producción. En Colombia, por ejemplo, existe el programa de Ganadería Sostenible, en el cual se busca aumentar el porcentaje de producción de carne y leche, reduciendo insumos mientras se busca mejorar la calidad de fuentes de agua y se incentiva al ganadero con el pago por servicios ambientales y asistencia técnica (FEDEGAN, 2012).

La diversidad del sector implica además que **no todos los sistemas productivos tienen acceso a mejores y nuevas tecnologías e innovaciones**, ni acceso a mercados que garanticen ingresos más altos para mejorar la gestión del recurso hídrico en los procesos productivos. Esto tiene que ver además con la falta de **inversión** pública y privada, debida principalmente a la informalidad en la propiedad de la tierra, la cual no representa garantías para la inversión privada y al modelo de subsidios fraccionado del Estado que afectan la eficiencia productiva⁷⁸, siendo modelos cortoplacistas.

Gran parte de las pérdidas en el agua suministrada para beber, se dan por el mal funcionamiento de los sistemas de conducción del agua, fallas en los dispositivos y por fugas en la red de tuberías. Para el sector porcino, se cuenta con una red de tuberías para el suministro de agua para beber, limpiar los corrales y enfriar a los cerdos. El equipo asociado a esta red son los chupones, los tanques para limpieza de animales y corrales, los compresores y en algunos casos aspersores y humidificadores para sistemas de enfriamiento, **las pérdidas que se estiman en las granjas porcinas pueden ser del 45% al 60% de la demanda de agua**⁷⁹. Según estos porcentajes y los cálculos realizados para el inventario porcino a 2016, **las pérdidas de agua asociadas al consumo vital del animal serían aproximadamente de 5,7 millones de m³/año, lo cual corresponde a aproximadamente 1.140 litros por cabeza al año.** En este subsector se encontraron diferencias significativas entre las fuentes de información consultadas para la demanda de agua en servicios, lo cual es un indicio de **falta de mediciones y control que puedan convertirse en información confiable para el monitoreo del uso del agua.**

En el sector avícola, el consumo excesivo de agua está asociado al incremento en los volúmenes de las aguas residuales. Adicionalmente, la mayoría de fuentes son aguas superficiales y subterráneas que normalmente son extraídas mediante bombeo para posteriormente ser tratadas previo el consumo animal, por lo cual **el uso ineficiente del recurso hídrico debe asociarse con ineficiencias energéticas.** En este sector el uso ineficiente de agua puede deberse a la falta de control en el consumo de agua, el no uso de barrido en seco, fugas en tuberías de conducción de agua y sistemas de almacenamiento y ausencia de programas de mantenimiento preventivo (FENAVI, 2014). Casos exitosos se han encontrado para este subsector con la instalación de bebederos automáticos y limpieza en seco (Cuadro 8).

⁷⁷ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en Taller de diagnóstico y priorización

⁷⁸ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en Taller de diagnóstico y priorización

⁷⁹ Información suministrada por PORCICOL para ENA 2014

De acuerdo con lo encontrado en este diagnóstico, los factores que influyen significativamente en la eficiencia y productividad del agua en el sector pecuario se observan en la Tabla 18 y corresponden a los mencionados para el sector agrícola.

Cuadro 8. Caso de éxito. Aumento de la eficiencia y productividad del agua en el subsector avícola

Caso incubadora Santander (CNPML, 2002)

Empresa grande del sector avícola. Su actividad comercial es producir huevos; con una producción promedio de 1'200.000 huevos/día. Anteriormente los bebederos de las aves estaban instalados en el piso y las instalaciones se limpiaban con agua. Con el objeto de optimizar el uso del agua el plan de manejo contempló la instalación de bebederos automáticos y sistemas de limpieza en seco.

La implementación de las medidas permitió obtener una reducción en los consumos de agua utilizada para el levante, de 750 ml/animal/día a 150 ml/animal/día y de agua utilizada en la etapa de postura de 1.500 ml/animal/día a 300 ml/animal/día. La reducción en el consumo de agua representó una disminución en los costos de la empresa, lo cual a su vez incrementó la productividad del agua.

5.2 VERTIMIENTOS EN EL SECTOR PECUARIO

La mayor parte del agua demandada por el sector pecuario regresa al ambiente en forma de orina, estiércol y aguas residuales. Las excretas de los animales contienen grandes cantidades de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio y también otros **compuestos como materia orgánica, residuos de medicamentos, metales pesados contenidos en el alimento que consumen los animales y patógenos, lo cual influye en la carga contaminante de los vertimientos y puede constituir un grave problema en la contaminación del agua** (FAO, 2006b).

Los vertimientos en este sector pueden ser puntuales, principalmente asociados a sistemas intensivos como los corrales de engorde y no puntuales, asociados a descargas difusas, principalmente en áreas extensas como pastizales. De este modo, la contaminación del agua se puede dar a través de escorrentía proveniente de los establos, por pérdidas originadas en filtraciones de las instalaciones de almacenamiento, por la deposición de materia fecal en las fuentes de agua dulce y por percolación profunda y transporte a través de las capas del suelo mediante las aguas de drenaje (FAO, 2006b).

En la producción avícola, las fuentes hídricas son afectadas principalmente por el vertimiento de AR provenientes de unidades productivas. En el caso de las granjas, esta situación se da por el uso ineficiente del agua en operaciones de lavado o por vertimiento directo sin ningún tipo de tratamiento, así como por arrastre de residuos sólidos como la gallinaza o pollinaza cuando ésta se encuentra almacenada inadecuadamente, o por elementos como plumas, animales muertos y polvo. En el “Estudio de gestión ambiental para la empresa avícola” realizado Gomez Daza (2012) se reporta que un pollo de ceba por cada kilogramo de alimento consumido produce de 0,2 a 0,3 kg de materia seca de excreta, lo que significa un volumen total de 0,7 a 0,8 kg de materia seca por pollo cebado, adicionalmente se calcula que para un total de 1.000 gallinas ponedoras se sitúan en torno a 120 kg de heces excretadas diariamente (Williams, 2011b).

Los contenidos en nutrientes de dichas excretas se pueden evidenciar en la Tabla 27, se destacan los pollos de engorde como los mayores productores de nutrientes por tonelada de heces excretadas, resaltando que la composición de dichos residuos depende de la alimentación que se le brinda al animal y que su composición es en un alto porcentaje nitrógeno y fosforo, así mismo factores como las prácticas

de gestión de la formulación de las dietas y la reglamentación de las empresas de producción avícola influyen en esta composición, es así que los residuos pueden contener microorganismos patógenos o residuos químicos de productos farmacéuticos como antibióticos, coccidiostáticos y larvicidas (Williams, 2011b). Se deben tener en cuenta además las aguas residuales y la sangre de las aves, la cual se estima que constituye el 2% del peso vivo y es una fuente con alta concentración de proteínas (Williams, 2011a).

Tabla 27. Estimaciones de los contenidos de nutrientes de la gallinaza procedentes de las camas de gallinas y pollos (kilogramo/tonelada de heces excretada).

	Nitrógeno	Fósforo (como pentóxido de fósforo)	Cobre	Zinc
Gallinaza de gallinas ponedoras	13,5	10,5	0,01	0,07
Gallinaza de pollos para carne	13,0	8,0	0,01	0,04
Cama de pollos de engorde	35,5	34,5	0,26	0,36

Fuente: (Williams, 2011b)

La afectación del recurso hídrico debida a los vertimientos del sector pecuario se da principalmente en zonas rurales y está asociada en gran medida a las incubadoras y plantas de beneficio en donde no existe un adecuado sistema de tratamiento de AR y se realiza la descarga directa a las fuentes hídricas superficiales (FENAVI, 2014), estas aguas contienen una elevada carga orgánica debido a los altos contenidos de grasas y aceites. Además, entre los residuos sólidos resultantes del beneficio de los animales se encuentran las cabezas y patas destinadas generalmente para el consumo humano, las vísceras, picos, plumas, uñas, entre otros, que representan un alto riesgo debido a las altas cantidades de animales sacrificados diariamente y al insuficiente control realizados sobre estos (Williams, 2011a)

Otros factores físicos como las fuertes pendientes, alta capacidad de drenaje (p. ej. suelos arenosos), frecuencia de vertimientos, alta carga orgánica y nivel freático elevado inciden también sobre la contaminación hídrica en el sector pecuario. Los altos contenidos de materia orgánica causan una disminución en el oxígeno disuelto. Así mismo, otros compuestos presentes en las excretas de los animales contribuyen a la contaminación biológica y pueden representar un riesgo para la salud pública (FAO, 2006b).

La porquinaza, está compuesta por las excretas de los animales unidas con el material utilizado como cama, los residuos de alimentos, agua y otros elementos producidos en las explotaciones porcícolas. Su contenido de humedad se encuentra alrededor del 88% y el contenido de materia seca es del 12%, la cantidad producida depende directamente de la edad del animal, su madurez fisiológica, el clima, la calidad y cantidad del alimento ingerido y finalmente el volumen de agua consumida. Se estima que diariamente en las excretas de los cerdos se producen por cada 100 kg de peso vivo alrededor de 0,25 kg de DBO₅; 0,75 kg de DQO; 0,3 kg de carbono orgánico total (COT); 0,045 kg de nitrógeno; 0,035 kg de fósforo y 0,035 kg de potasio (Sociedad de Agricultores de Colombia - SAC, 2002).

En la Tabla 28 se muestra la composición diaria de los nutrientes que contiene la porquinaza dependiendo del estado fisiológico en el que se encuentra el animal, este se compone principalmente de nitrógeno orgánico y de amoníaco, óxido de potasio y fósforo.

Tabla 28. Producción diaria de nutrientes según estado fisiológico porcino

Estado	Peso Kg	Nitrogeno		Óxido de potasio		Óxido de fosforo	
		Gr / Animal	Gr / 100 Kg de animal	Gr / Animal	Gr / 100 Kg de animal	Gr / Animal	Gr / 100 Kg de animal
Hembra lactante		133		69		79	
Pie de cría no lactante		52		31		34	
Precebos	16		54,3		36,8		36,7
Levante	35		45,1		31,1		34,4
Finalización	80		44,5		34,9		34,9

Fuente: (MAVDT, 2002)

La composición de la porquinaza es de aproximadamente 55% de heces y 45% de orina, las bacterias no siempre están presentes en el estiércol de cerdos y su toxicidad es considerablemente menor en comparación al estiércol generado por las aves, sin embargo, es fuente de bacterias como Salmonella, Brucella, Yersinia, Mycobacterium, Leptospira, Escherichia coli y Campilobacter (Castrillón Quintana, Jiménez Pérez, & Bedoya Mejía, 2004), por lo cual son de especial importancia y se debe realizar un control detallado de los cerdos infectados para evitar posibles enfermedades y contaminaciones en la población.

En lo reportado en el informe “Larga Sombra Del Ganado” (FAO, 2006a), se estima que los sistemas de producción mixtos son los mayores contribuyentes a la producción de nitrógeno y potasio, con un porcentaje del 70,5%, seguidamente se encuentran los sistemas en pastoreo con un 22,5% de la excreción anual. En la Tabla 29 se muestra la ingesta y excreciones de nutrientes por especie animal en situaciones productivas y se reporta que para el año 2004 las excretas a nivel global del ganado contenían 135 y 58 millones de toneladas de nitrógeno y de potasio respectivamente, situando al ganado bovino como el principal responsable de la excreción de nutrientes, con un 58% de nitrógeno; seguido a este se encuentran las explotaciones porcícolas con un total de 12% y las producciones avícolas con un 7%.

Tabla 29. Ingesta y excreciones de nutrientes por especie animal en situaciones de alta productividad

Animal	Ingesta (Kg/Año)		Retención (Kg/Año)		Excreción (Kg/Año)		Porcentaje de N excretadoe
	N	P	N	P	N	P	
Vaca de leche	163,7	22,6	34,1	5,9	129,6	16,7	69,0
Cerda	46,0	11,0	14,0	3,0	32,0	8,0	73,0
Cerdos en crecimiento	20,0	3,9	6,0	1,3	14,0	2,5	78,0
Gallina ponedora	1,2	0,3	0,4	0,0	0,9	0,2	82,0
Pollo de asar	1,1	0,2	0,5	0,1	0,6	0,1	83,0

Fuente: (FAO, 2006a)

En principio existen tres alternativas para manejar el estiércol y las sustancias que éste contiene, cada una genera diferentes impactos al ambiente. La primera de ellas corresponde a la descarga directa, práctica que debe evitarse debido a sus impactos ambientales por las sustancias contenidas en el vertimiento. La segunda, consiste en el tratamiento del estiércol eliminando las sustancias con relevancia ambiental y realizando la descarga del agua restante. La materia orgánica y el nitrógeno se pueden degradar en un grado muy alto, mientras que los minerales y los metales pesados tienen que ser concentrados y sacados del sistema a un uso alternativo o a la disposición apropiada. La tercera

alternativa consiste en reciclar como fertilizante en tierra o alimento para peces o ganado tanto la sustancia orgánica, como el nitrógeno y los minerales producidos (Gerber & Menzi, 2006).

Entre las limitaciones en el tratamiento de estiércol se incluyen los costos de inversión y funcionamiento de los sistemas que, aunque están sujetos a economías de escala, se consideran elevados. Igualmente, el área puede ser un factor limitante, especialmente en el tratamiento por medio de estanques anaerobios y aerobios, siendo el reciclaje de estiércol la opción más viable en la mayoría de los casos. Para esta práctica se debe contar con sitios adecuados para el almacenamiento, ya que si no se almacena en áreas confinadas, esta materia orgánica fluirá hacia los cursos de agua (Gerber & Menzi, 2006), durante este almacenamiento se debe también asegurar un adecuado proceso de estabilización de los lodos generados, para así reducir la presencia de patógenos y eliminar los olores desagradables.

En la producción pecuaria a gran escala, el problema de calidad de agua ha disminuido en la actualidad debido a que hoy en día los desechos animales son percibidos como un producto con potencial económico que puede convertirse en fertilizante y biogás (FAO, 2013a). Para Colombia, los vertimientos del sector pecuario están regulados por la Resolución 631 de 2015 del MADS, en la cual se establecen los límites máximos permisibles para algunos compuestos y se listan los parámetros que deben ser monitoreados. **Es importante resaltar que para este sector no se establecen límites máximos permisibles para los compuestos de fósforo total y nitrógeno total, los cuales constituyen unos de los contaminantes más importantes asociados a la producción pecuaria.**

Otro factor que incide en la contaminación del agua proveniente del sector pecuario es el uso de medicamentos, como antimicrobianos y hormonas, que son ampliamente utilizados y hacen parte de los llamados contaminantes emergentes, los cuales en la mayoría de los casos no se encuentran regulados, pero se conoce que tienen efectos negativos sobre la salud ya que actúan como disruptores endocrinos y además afectan el tratamiento de aguas residuales, al inhibir la actividad biológica. La ineficiencia de los métodos convencionales utilizados en los sistemas de tratamiento de agua residual para eliminar estos contaminantes emergentes, motiva el desarrollo de nuevas tecnologías y de métodos más eficientes, por ejemplo sistemas terciarios avanzados, que logren remover este tipo de contaminación (FAO, 2006b; Tejada, Quiñones, & Peña, 2014).

5.3 REÚSO

En el caso del sector pecuario, la normativa es clara en términos de que el reúso en este sector no está permitido ni para el consumo de agua vital de los animales ni en el consumo de agua de servicios. La Resolución 1207 de 2014 no incluye el uso pecuario al que se refiere este estudio⁸⁰ como uno de los usos del AR tratada, excepto si se refiere al riego de pastos para consumo animal, los cuales son considerados como cultivos y por tanto se encuentran en el sector agrícola y así mismo están sujetos a los criterios de calidad para este sector, establecidos en el Artículo 7 de la misma Resolución, además de las normas de calidad establecidas por la autoridad sanitaria y agrícola competente. En esta Resolución se aclara además que se prohíbe el pastoreo de los animales en los primeros 15 días después de la irrigación con agua residual tratada⁸¹.

⁸⁰ Consumo vital de agua de los animales y lavado de lugares de alojamiento.

⁸¹ Parágrafo 2, artículo 7, Resolución 1207 de 2014

Para este sector, el Ministerio de la Protección Social expidió el Decreto 1500 de 2007⁸², en el cual se exige mediante un plan de saneamiento a todo predio destinado a la producción de animales velar por el control de los riesgos asociados al proceso productivo, en primer lugar, asegurando *“Disponer de agua con la calidad y cantidad suficiente, de manera que satisfaga las necesidades de los animales y se eviten riesgos sanitarios y a la inocuidad”*. Adicionalmente, en el Artículo 26, se determinan las condiciones mínimas bajo las cuales se obtiene la carne, los productos cárnicos comestibles y los derivados cárnicos, aplicando por igual a los lugares de alojamiento.

Por otra parte, en los documentos del Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES 3375, 3376, 3458 y 3468, las guías ambientales para cada subsector y la normativa asociada a la política sanitaria y de inocuidad de los alimentos, especialmente la Ley 9 de 1979, el Decreto 1500 de 2007 y las Resoluciones 2341 de 2007, 2640 de 2007 y 2242 de 2013 siempre se hace referencia a la necesidad de agua potable, para el consumo de los animales como para las actividades de limpieza de lugares de alojamiento y del personal, lo cual restringe el reuso del agua en este sector. En este sector no se han encontrado casos de reuso en el consumo vital de los animales, sin embargo, se han identificado casos de uso de AR provenientes de este sector principalmente en el sector agrícola, sector en el cual sí se ha identificado un gran potencial de reuso. Se encuentra importante destacar que existen casos exitosos de uso de AR tratada en actividades asociadas a la limpieza de las granjas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Caso de éxito. Eficiencia, reuso y tratamiento de AR en Puerto Rico

Granja porcina la Ceba (Corujo, 2016a)

La granja porcina de Empresas La Ceba, ubicada en el municipio de Corozal (Puerto Rico), es una de las granjas más grandes del país y produce más de 4.500 cerdos al año. En ella se han implementado medidas para disminuir el consumo de agua y los vertimientos generados. Una de estas medidas consiste en un sistema de rejillas en cemento donde los animales quedan en un piso elevado y el excremento va pasando a una fosa inferior. Una corriente de agua limpia la fosa y lleva los desechos a un tanque de separación por decantación, donde los sólidos se van al fondo y el agua usada pasa a una laguna con una capacidad de casi dos millones de litros. El agua de la charca que ya tiene un tratamiento primario, puede ser reutilizada para limpiar las fosas o ser regada en las áreas de la finca dedicadas a la siembra o a los pastos, donde luego se alimenta el ganado. Este sistema de rejillas conlleva a una reducción en la cantidad de aguas residuales que se genera en comparación a las operaciones tradicionales. Por otro lado, la granja tiene un sistema de recolección de agua lluvia con capacidad de 18 mil galones, esta recolección se lleva a cabo sobre un techo de 50 mil pies y posteriormente se almacena en una gran cisterna. Cuando no hay agua en el municipio de Corozal, la granja puede seguir operando. En 2015, la sequía que hubo en la Isla no afectó las operaciones de la granja. Los sistemas utilizados en esta granja reducen en un 50% el consumo del agua. Cabe resaltar que para el consumo animal se utiliza agua potable y que el programa de reutilización de AR cuenta con todos los permisos de la Junta de Calidad Ambiental y agencias reguladoras.

El caso presentado para la granja porcina La Ceba (Cuadro 9) representa un avance significativo para la disminución del consumo de agua en las explotaciones porcinas, en las cuales, por lo general, los sistemas de lavado de los corrales y de los animales son realizados diariamente y de manera manual sin medir el consumo de agua o mediante sistemas de agua a presión presentando altas tasas de consumo, lo cual a su vez indica una baja conciencia ambiental (Chao Espinosa et al., 2012).

⁸² “Por el cual se establece el reglamento técnico a través del cual se crea el Sistema Oficial de Inspección, Vigilancia y Control de la Carne, Productos Cárnicos Comestibles y Derivados Cárnicos, destinados para el Consumo Humano y los requisitos sanitarios y de inocuidad que se deben cumplir en su producción primaria, beneficio, desposte, desprese, procesamiento, almacenamiento, transporte, comercialización, expendio, importación o exportación”

Adicionalmente, los sistemas de recolección del agua residual que es utilizada en los corrales influyen en el tiempo de disminución en las operaciones. Las naves elaboradas con materiales que permitan un fácil manejo de los residuos tanto sólidos como líquidos y además con una leve inclinación facilitan el proceso de reciclaje del agua y evitan el encharcamiento dentro de los corrales, los cuales pueden ser hospederos de hongos, parásitos, entre otros elementos que pueden ser perjudiciales para la sanidad tanto de los animales como de las personas que deben ingresar en el corral. Del mismo modo, la separación de los residuos sólidos mediante la ayuda manual y no con agua a presión, también permite que puedan ser utilizados como abono de los pastos, y un correcto sistema de tratamiento del agua proporciona que pueda ser bombeada y reutilizada para diferentes usos como un sistema de riego de los potreros, lavado de naves, entre otros (Corujo, 2016b).

6 SECTOR AGUA POTABLE

El agua potable es la utilizada en actividades tales como bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato; para satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios; y para preparación de alimentos en general, y en especial, los destinados a su comercialización o distribución (MAVDT, 2010). Los usos anteriores también incluyen el subsector servicios, el cual se refiere a comercio, instituciones y oficinas.

La Ley 142 de 1994⁸³, define el servicio público domiciliario de agua potable llamado también servicio público domiciliario de acueducto, como la distribución municipal de agua apta para el consumo humano, incluida su conexión y medición.

El sector de agua potable en Colombia tiene su marco jurídico en la Constitución Política de 1991 y en la Ley 142 de 1994, siendo un sector descentralizado donde la competencia para la prestación de los servicios le corresponde a los municipios, mientras que la formulación de política, la regulación, la vigilancia y control están en manos del Gobierno Nacional (SSPD, 2014a). La responsabilidad de la formulación de política pública para el sector está en cabeza del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, la vigilancia y control de los prestadores de los servicios le corresponde a la SSPD, y la regulación económica (formulación de metodologías tarifarias que deben aplicar los prestadores para la fijación de las tarifas a cobrar a los usuarios y para la promoción de la competencia) está a cargo de la Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico - CRA (*ibid.*).

La Resolución 330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Éste reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.

El análisis del presente capítulo incluye el subsector de agua potable y la información que es reportada por los prestadores de este servicio. Según el número de suscriptores (usuarios) y el tipo de servicio que se clasifica en residencial, comercial, institucional y de oficinas, las empresas prestadoras se pueden clasificar, en “grandes prestadores” como aquellas que atienden más de 2.500 suscriptores y “pequeños prestadores” aquellos que atienden menos de este número.⁸⁴

6.1 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD

En el ENA 2014 se encontró que **la demanda para uso doméstico y servicios (comercio, instituciones y oficinas) es de 3.445,2 millones m³ que equivalen al 9,5% de la demanda nacional.** De esta demanda 2.963,4 millones m³ corresponde al uso doméstico y 481,8 millones m³ al uso servicios (IDEAM, 2015b).

Los sectores agua potable y servicios tienen mayor demanda de agua, en su orden, en **las subzonas de los ríos: Bogotá, Porce, Lili, Meléndez y Cañaveralejo, directos al Bajo Magdalena entre Plato y Calamar (mi), Lebrija y otros directos al Magdalena, en conjunto usan el 39% del caudal total del sector agua**

⁸³ “Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones”.

⁸⁴ Según lo establecido en la Resolución 287 de 2004 de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico – CRA

potable. El 46% de la demanda para servicios también se concentra en los ríos Bogotá, Porce, Lebrija directos al Magdalena junto con los de las subzonas de los ríos Sumapaz, y Guayuriba (IDEAM, 2015b). En general, la mayor demanda de agua para uso en este sector se realiza en el Área Hidrográfica del Magdalena Cauca y la menor demanda en el AH del Amazonas (Tabla 30).

Tabla 30. Distribución porcentual del uso de agua para el sector agua potable y saneamiento básico en las áreas hidrográficas

Uso del agua	Área hidrográfica					Total
	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico	
Doméstico (%)	12,5	74,6	5,0	2,3	5,6	100
Servicios (%)	8,6	80,2	8,6	1,1	1,5	100

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM, 2015)

En la Figura 30 se muestra la cobertura rural y urbana de acueducto según datos de 1086 municipios de Colombia reportados en el SUI para el año 2016. En total, **509 municipios (46,9%) presentan una cobertura mayor al 60% de los cuales, 221 (20,3% del total) tiene una cobertura superior al 90%.** Sin embargo, **129 municipios presentan una cobertura inferior al 20%** los cuales se encuentran ubicados en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Casanare, Cauca, Cundinamarca, Meta, Nariño, Santander, Norte de Santander y Valle del Cauca (SSPD, 2017).

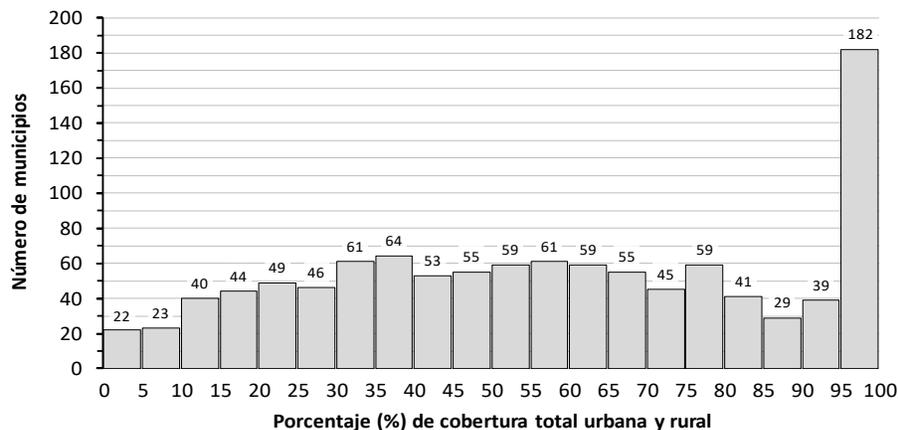


Figura 30. Cobertura total urbana y rural de acueducto en los municipios de Colombia en 2016

Fuente: Información reportada en el SUI

En cuanto a cobertura de acceso al agua potable a nivel de América Latina y el Caribe, según datos de la CEPAL (2015), **Colombia a pesar de presentar una cobertura promedio del 91%, ocupa el lugar 13 en relación con los 18 países analizados** (Tabla 31). Según la CEPAL, Colombia solo aumentó un punto porcentual entre 2000 y 2015 (de 90% al 91%) siendo este uno de los menores incrementos comparado con los países de la región.

Tabla 31. Porcentaje de acceso a agua potable en América Latina y el Caribe

	País	Año	
		2000	2015
1	Uruguay	97	100
2	Argentina	96	99

	País	Año	
		2000	2015
3	Chile	95	99
4	Costa Rica	95	98
5	Brasil	93	98
6	Paraguay	73	98
7	México	89	96
8	Cuba	91	95
9	Panamá	90	95
10	El Salvador	82	94
11	Venezuela	91	93
12	Guatemala	84	93
13	Colombia	90	91
14	Honduras	81	91
15	Bolivia	79	90
16	Ecuador	80	87
17	Perú	80	87
18	Nicaragua	79	87

Fuente: Elaboración propia a partir de CEPAL (2015)

En pro de un uso eficiente del agua en el sector de agua potable, la CRA ha establecido el rango de consumo básico destinado a satisfacer las necesidades esenciales de consumo de las familias, este valor fue establecido desde el 2001⁸⁵ en 20 m³ por suscriptor al mes y se había mantenido constante hasta la expedición de la Resolución CRA 750 de 2016 en la cual establecieron los siguientes niveles de consumo básico:

- 16 m³/suscriptor/mes para municipios ubicados en clima cálido,
- 13 m³/suscriptor/mes para municipios ubicados en clima templado y
- 11 m³/suscriptor/mes para municipios ubicados en clima frío.

Sin embargo, estos valores entrarán en vigor a partir del 1 de enero de 2018, implementándose un período de progresividad en la aplicación de esta dotación. De acuerdo con esta resolución, se establecerán tarifas diferenciadas que carguen mayor costo a los consumos definidos como: complementario⁸⁶ y un cobro mucho mayor al suntuario⁸⁷, buscando así incentivar el consumo racional del agua.

La disminución del nivel de consumo básico genera un beneficio en términos de la sostenibilidad del recurso hídrico, puesto que incentiva un consumo más racional del recurso. Esta medida entra en concordancia con los esfuerzos que realiza el gobierno nacional para que la ciudadanía realice un uso eficiente de agua ante los escenarios de cambio climático.

En general y conforme a lo reportado en el Informe sectorial de acueducto y alcantarillado (SSPD, 2015) **el agua producida en plantas de potabilización en 2013 fue de 878,87 millones m³, mientras que en el 2014**

⁸⁵ Resolución CRA 151 de 2001. Por la cual se establece la regulación integral de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.

⁸⁶ Consumo complementario: Para clima frío entre 11 y 22 m³, clima templado entre 13 y 26 m³ y clima cálido entre 16 y 32 m³

⁸⁷ Consumo suntuario: Para clima frío mayor a 22 m³, clima templado mayor a 26 m³ y clima cálido mayor a 32 m³

se pasó a 855,53 millones metros cúbicos disminuyendo en un 3% a pesar de que el número de suscriptores de acueducto aumentó en 1,8%. Del total de agua producida, los usuarios residenciales son responsables del 97% del total de consumo, mientras que los usuarios no residenciales o de servicios representaron el 3% del total de consumo⁸⁸.

En Colombia, el consumo de agua promedio de los suscriptores residenciales en 2014 fue de 15,44 m³/suscriptor/mes para municipios ubicados en clima cálido, 13,22 m³/suscriptor/mes para municipios ubicados en clima templado y 10,60 m³/suscriptor/mes para municipios ubicados en clima frío (CRA, 2015a), presentándose una tendencia decreciente generalizada del consumo (Figura 31). Estos consumos promedio se encuentran en el rango establecido por la CRA a partir del 2016.

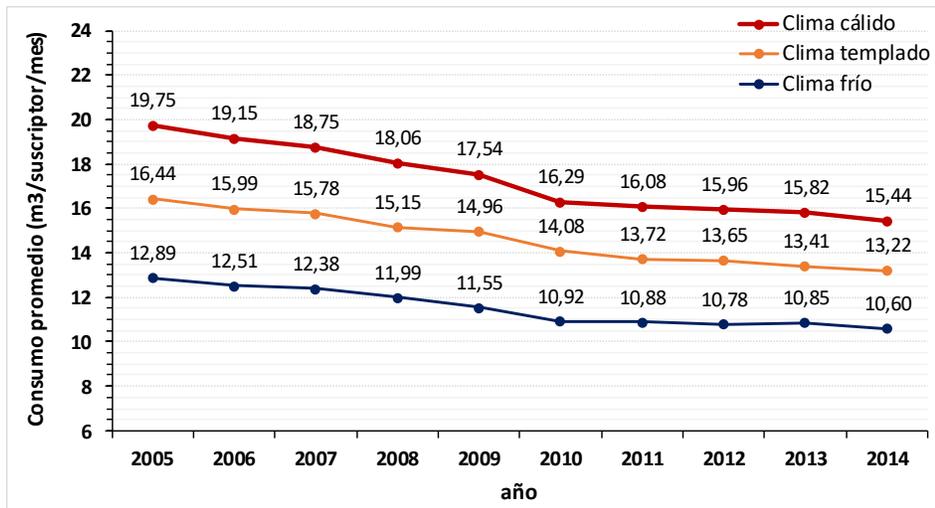


Figura 31. Consumo promedio anual por usuario de los estratos 1 a 6 en municipios ubicados en climas cálido, templado y frío entre los años 2005 a 2014
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CRA, 2015a

En el ámbito Latinoamericano, el consumo básico establecido en Colombia por la CRA desde el 2016 (para los climas frío y templado) es el segundo más bajo comparado con otros países de la región. En la Tabla 32 se presenta el comparativo de estos consumos.

Tabla 32. Consumo básico de agua potable en América Latina.

PAÍS	CONSUMO BÁSICO (m ³ /vivienda/mes)
Uruguay	10
Bolivia	15
Chile	15
Panamá	15
Paraguay	15
Colombia	11 - 16
Argentina	20
Brasil	15 - 20
Nicaragua	20

⁸⁸ Para el análisis se consideró únicamente los datos de 50 empresas que son grandes prestadores que tienen información completa registrada en el SUI y que representan una muestra de 6.438.358 (82,6%) suscriptores (SSPD, 2015)

PAÍS	CONSUMO BÁSICO (m ³ /vivienda/mes)
Perú	20
Costa Rica	25

Fuente: (CRA, 2015a)

Otro de los incentivos establecidos por la CRA en pro del uso eficiente del agua, ha sido el reconocimiento de un nivel máximo de pérdidas de agua después de la potabilización, a través de las tarifas. **El nivel de pérdidas de agua o Índice de agua no contabilizada (IANC) es uno de los indicadores de eficiencia más importantes en este sector.** Este indicador refleja en buena medida tanto la gestión técnica como operativa de las empresas prestadoras de los servicios públicos.

El término “pérdidas” se ha relacionado comúnmente con otros términos como “desperdicio” o “ineficiencia”, por lo cual en la medida en que una empresa presente pérdidas del bien que debe suministrar, se debe estudiar e investigar en qué otros aspectos se ve reflejada esta pérdida (CRA, 2013). Las pérdidas de agua en los sistemas de suministro afectan diferentes aspectos, por lo cual se consideran un obstáculo para la sostenibilidad, en la cual se deben considerar aspectos económicos, técnicos, sociales y ecológicos, tal como se observa en la Figura 32.

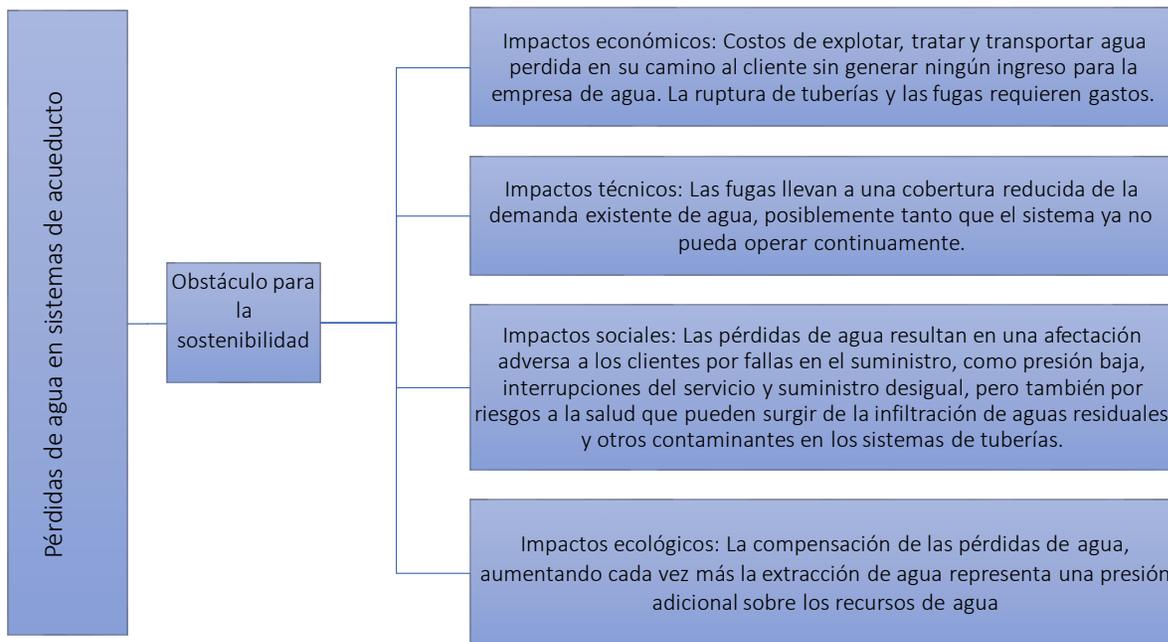


Figura 32. Relación entre pérdidas de agua y sostenibilidad

Fuente: Elaboración propia a partir de (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) & VAG-Armaturen GmbH, 2011)

Establecer un balance hídrico a intervalos regulares proporciona la base para eliminar las pérdidas de agua. Con base en esta afirmación la asociación internacional del agua (IWA por su nombre en inglés, International Water Association), ha propuesto la terminología presentada en la Tabla 33 para describir los componentes del balance hídrico en las empresas de acueducto (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) & VAG-Armaturen GmbH, 2011).

Tabla 33. Terminología de balance hídrico propuesta por IWA

Volumen de entrada al sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo facturado medido	Agua Facturada	
			Consumo facturado no medido		
	Pérdidas de Agua	Consumo autorizado no facturado		Consumo no facturado medido	Agua No Facturada
				Consumo no facturado no medido	
		Pérdidas aparentes (Comerciales)		Consumo no autorizado	
				Inexactitud de la medición y errores en el manejo de los datos de lectura de medidores	
			Pérdidas reales (Físicas)	Fugas en tuberías de conducción y en redes principales de distribución	
				Fugas y desbordamiento en tanques de almacenamiento	
Fugas en acometidas					

Fuente: (CRA, 2015b)

La cantidad de agua perdida por fugas en las redes de distribución urbana de agua (pérdidas físicas o reales de agua) y los volúmenes de agua distribuidos sin facturación (pérdidas de agua aparentes) pueden ser elementos que complican la situación de suministro de agua, especialmente en los países en desarrollo y en transición. Las pérdidas de agua reales y aparentes, junto con el consumo autorizado no facturado (por ejemplo, para abastecer las troncales antiincendios), constituyen la cantidad de agua no facturada (ANF) en un sistema de suministro (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) & VAG-Armaturen GmbH, 2011).

“El Banco Mundial estima que el volumen anual de ANF en los países en desarrollo está en el rango de 26,7 mil millones de m³, lo cual representa aproximadamente USD 5,9 mil millones que pierden las empresas de agua cada año. La reducción de esta cantidad de pérdidas de agua a la mitad, generaría ganancias considerables y suficiente agua para suministrar agua a 90 millones de personas más en los países en desarrollo” (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) & VAG-Armaturen GmbH, 2011).

A nivel mundial una de las metodologías más aceptadas para determinar las pérdidas de agua en un sistema es el balance propuesto por la Asociación Internacional del Agua – IWA (CRA, 2013), esta metodología analiza cada uno de los componentes en el desarrollo de la operación, partiendo desde el volumen inicial del agua que ingresa a la red, los niveles de medición de la facturación al cliente, así como el control de las posibles fugas y consumos adicionales al proceso normal de venta.

En la Figura 33 se presenta un esquema del uso del agua en el sector agua potable, en el cual se indican los sitios en los cuales se debe realizar la macromedición y la micromedición, lo cual es de gran importancia para establecer el balance de agua y por ende conocer las pérdidas y eficiencia en el sistema. Adicionalmente, se incluye el sistema de alcantarillado, el cual consta de una red de recolección y posteriormente un tratamiento de aguas residuales o disposición directa a un cuerpo de agua en algunos casos. Por otro lado, se presenta el reúso como una posibilidad, a partir de aguas residuales tratadas provenientes del sector.

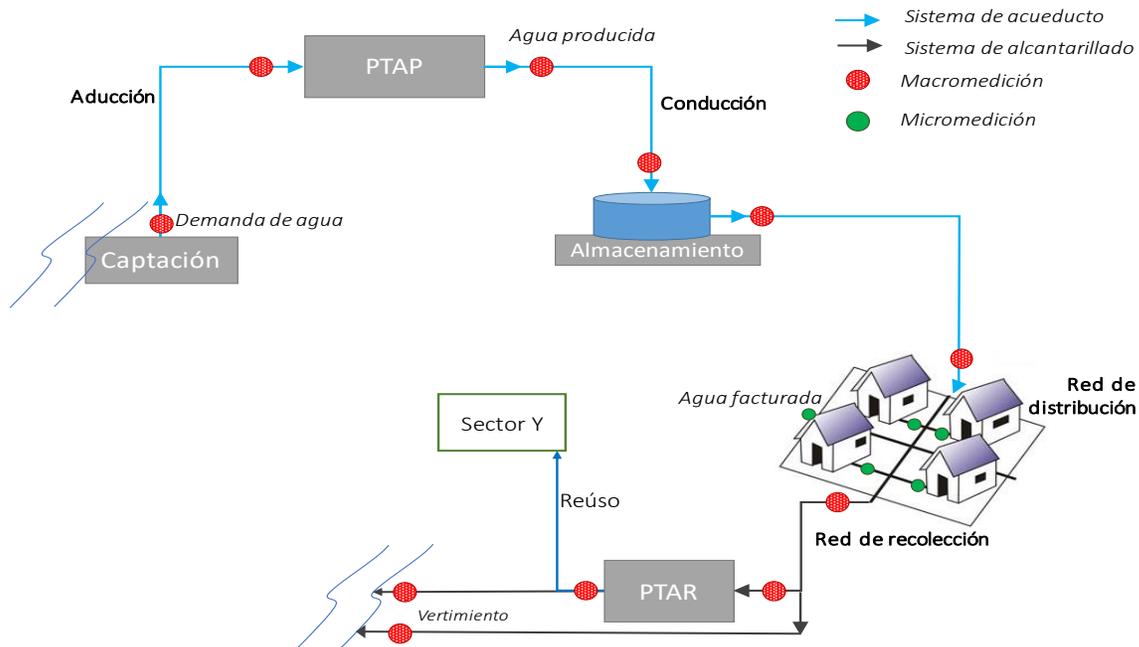


Figura 33. Esquema de uso del agua en el sector Agua Potable
Fuente: Elaboración propia

El RAS 2000, numeral B 2.5 de la Sección II del Título B, establecía los niveles máximos de pérdidas técnicas, para el cálculo de la dotación bruta⁸⁹, en los diferentes componentes del sistema de acueducto, tales como: la aducción (<5%), la planta de tratamiento (5%), la conducción (<5%) y las pérdidas de agua en la red de distribución (20-40%), los cuales representan en gran medida la eficiencia funcional y operacional de un sistema. Sin embargo, de acuerdo con la nueva resolución 0330 de 2017, el porcentaje de pérdidas técnicas para el cálculo de la dotación bruta en todos los componentes del sistema no deberá superar el 25%. Uno de los problemas que se ha identificado⁹⁰ para establecer estas pérdidas en cada uno de los componentes del sistema, es la falta de monitoreo (macro y micromedición) ya sea por capacidad técnica, económica o por oposición de los usuarios para permitir que se realicen las mediciones⁹¹. Otro de los inconvenientes que se presentan es que muchos prestadores no entregan información o la información suministrada al SUI no es confiable (Salinas Ramírez, 2011) (CRA, 2013).

En la Figura 34 se presentan las pérdidas técnicas en el sistema de acueducto, teniendo como base 10 grandes empresas prestadoras, estas pérdidas se pueden presentar en la aducción (pérdidas técnicas desde la captación hasta el ingreso de la PTAP), el tratamiento (pérdidas por estanqueidad, consumo interno de la planta, reboses), la conducción (pérdidas técnicas desde la PTAP hasta los tanques de almacenamiento), almacenamiento (pérdidas por estanqueidad, reboses, fisuras) o en la red de distribución (pérdidas comerciales y técnicas). En la Figura 34 se observa cómo la mayor información de pérdidas reportadas, se han realizado en la red de distribución y en las plantas de tratamiento y en menor medida se conocen las pérdidas que se presentan en el almacenamiento y en los sistemas de aducción.

⁸⁹ Dotación bruta: Es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante considerando para su cálculo el porcentaje de pérdidas técnicas que ocurran en el sistema de acueducto.

⁹⁰ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en Taller comité consultivo 1 "diagnóstico y priorización"

⁹¹ En el Taller comité consultivo 1 "diagnóstico y priorización" se identifica como una dificultad desde el ámbito social, la oposición que se presenta en algunas regiones del país para que se realice la micromedición.

El mayor porcentaje de pérdidas ocurren en la red de distribución superando en la mayoría de los casos reportados el valor máximo recomendado por la CRA (MADS & ANDESCO, 2013).

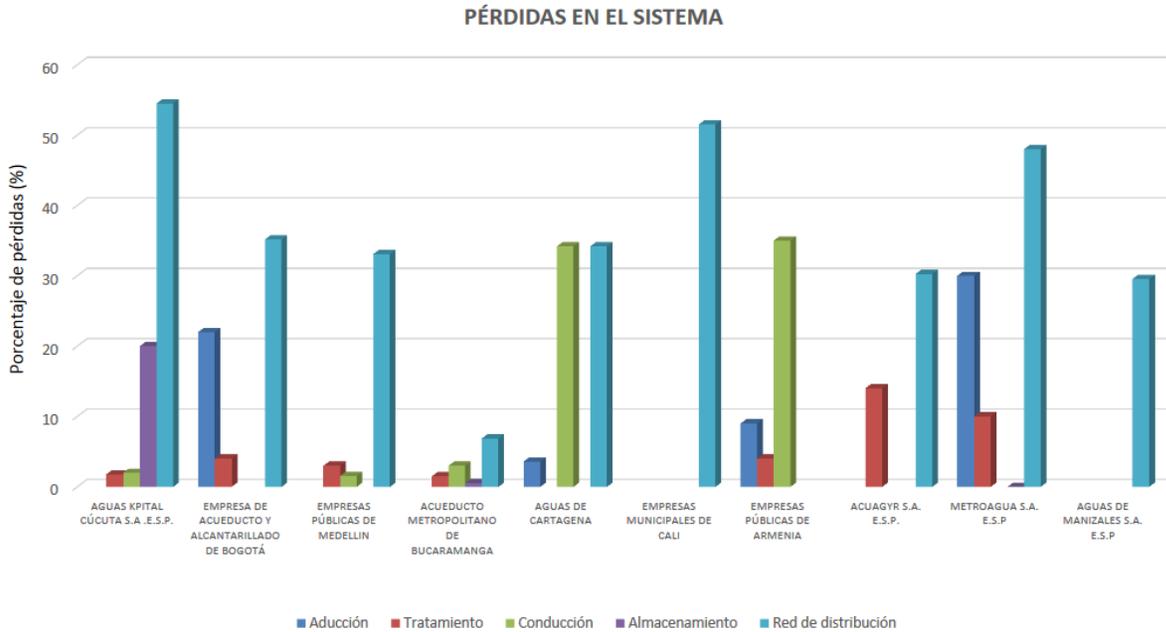


Figura 34. Porcentaje de pérdidas técnicas en el sistema de acueducto. Ausencia de barra en el gráfico indica que el dato no fue reportado. Fuente: (MADS & ANDESCO, 2013)

El indicador de pérdidas del sector es el índice de agua no contabilizada - IANC (CRA, 2007). Éste es un indicador porcentual que compara el volumen de agua facturado a los usuarios del servicio de acueducto, respecto al volumen de agua que se produce en las plantas de tratamiento de agua potable (Ecuación 11); lo cual da un estimado de las pérdidas que se tienen en la red de distribución, entre otras, por fugas en red, conexiones fraudulentas o mediciones de consumo imprecisas (SSPD, 2015).

Ecuación 11. Cálculo IANC

$$IANC = \frac{\text{Volumen producido} - \text{Volumen facturado}}{\text{Volumen producido}}$$

La ley 142 de 1994 establece que, en el marco tarifario de servicios públicos, se tendrá en cuenta “...un nivel de pérdidas aceptable según la experiencia de otras empresas de servicios públicos eficientes”. Al respecto, la CRA ha establecido que el nivel máximo de pérdidas de agua (tanto técnicas como comerciales) aceptable para el cálculo de los costos de prestación del servicio de acueducto será del 30%, siendo esta una de las estrategias estatales para desincentivar los altos niveles del indicador, restringiendo el cobro de pérdidas superiores en el cálculo de la tarifa cobrada a los usuarios por parte de las empresas de servicios públicos.

En la Figura 35 se presenta la distribución relativa del IANC (%) por municipio para los años 2013 y 2014, índice calculado con la metodología establecida en la Resolución CRA - 315 de 2005. Se observa que **aún existen grandes dificultades a nivel técnico en la reducción de los niveles de pérdidas, debido a que el 81,4% de los municipios en el 2013 y el 81,82% en el 2014 presentaron pérdidas mayores al 30%**; lo cual es señal también del nivel de eficiencia con que se está prestando el servicio a los usuarios y los costos

que deben asumir las empresas. En particular, para los municipios de Quibdó (80%), Buenaventura (87%), Ciénaga (83%), Apartadó/Carepa/Chigorodó/Mutató (89%) y Riohacha (80%), se presentaron en el 2014 niveles de pérdidas superiores al 80%, los cuales también se ven reflejados en otros indicadores como la continuidad del servicio (SSPD, 2015). Estos altos niveles de pérdidas se explican por factores como el bajo nivel de micromedición, fugas en la red de distribución y conexiones fraudulentas.

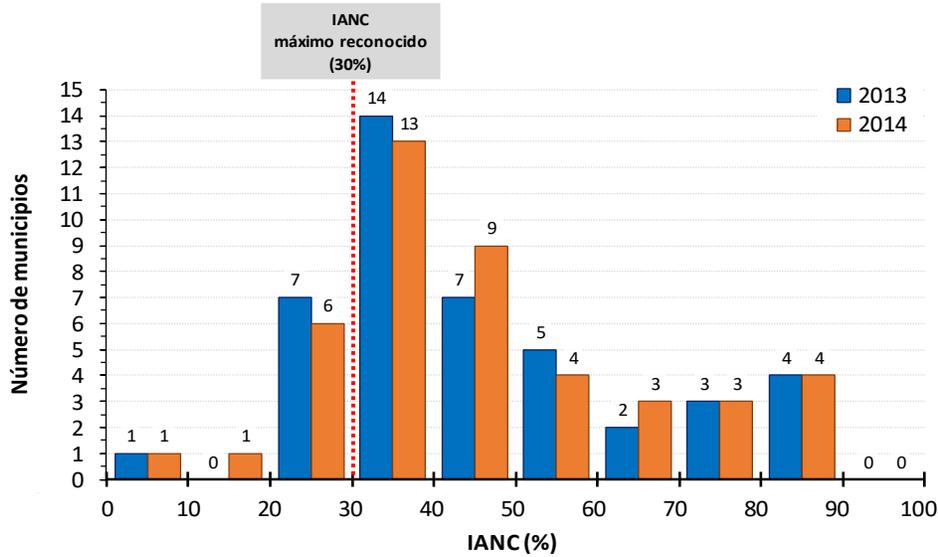


Figura 35. Índice de agua no contabilizada – IANC (%) por municipio, para los años 2013 y 2014
Fuente: (SSPD, 2015)

El promedio nacional del IANC en 2016 fue del 40,0% el cual evidenció una disminución de 8,5 puntos porcentuales respecto al año anterior, es de aclarar que este año solamente 23 empresas han reportado los datos al SUI, mientras que para los años anteriores el promedio ha sido de 119 empresas. Lo cual evidencia la **baja capacidad que tienen las empresas prestadoras para recolectar, consolidar y realizar los reportes de información al SUI**⁹². En la Figura 36, se presenta el promedio anual del IANC nacional entre los años 2010 y 2016.

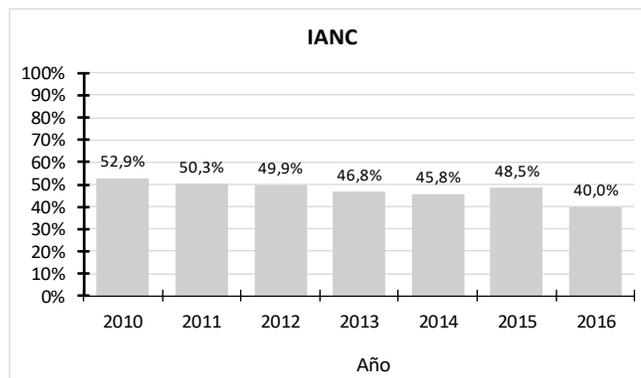


Figura 36. Promedio anual de Índice de agua no contabilizada en Colombia. Período 2010 – 2016
Fuente SUI. Elaboración propia

⁹² Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en Taller comité consultivo 1 “diagnóstico y priorización”

Según la CRA (2013) en el momento de expedición de la Ley 142 de 1994, la mayoría de empresas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto presentaban un nivel de pérdidas considerablemente elevado, por lo cual el uso del IANC se consideró adecuado, al punto que éste reflejó una mejoría en dichos niveles de pérdidas (Figura 36).

La revisión bibliográfica internacional, basada principalmente en los estudios adelantados por la IWA, así como las experiencias de los prestadores del servicio público domiciliario de acueducto en Colombia, muestran que la bondad y robustez del IANC, se ven afectadas significativamente por aspectos como variaciones en la demanda de agua, el volumen de agua exportado o importado al sistema y el volumen de agua facturado, por lo cual **se recomienda el uso de otro tipo de indicadores que reflejen de mejor forma la gestión de las personas prestadoras y el establecimiento de metas de reducción de los niveles de pérdidas que sean reales y viables de alcanzar** (CRA, 2013).

“Dentro de las razones principales que se encuentran para tal afirmación, están las relacionadas con la ineficacia del IANC para medir pérdidas en condiciones de reducción de consumos, por efecto de la elasticidad precio-demanda, en condiciones de discontinuidad del servicio y por el uso de acuerdo con el clima. En efecto, dos empresas con el mismo nivel de pérdidas por suscriptor pueden tener un IANC eficiente o excesivo dependiendo del nivel de consumo por suscriptor, lo que lo hace un indicador inadecuado para monitorear un plan de reducción de pérdidas. Esta es una de las situaciones detectadas y discutidas ampliamente por agentes del sector, por lo cual se puede señalar que existe consenso respecto de migrar a indicadores de pérdidas de tipo volumétrico” (CRA, 2014).

De acuerdo con el documento “Nivel de pérdidas aceptable para el cálculo de los costos de prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado” (CRA, 2013), a nivel internacional se ha encontrado que **se debe reevaluar el uso de indicadores porcentuales como el IANC**, y se debe propiciar el uso de indicadores que reflejen el volumen de agua perdida, normalizados por parámetros como número de suscriptores, número de conexiones, longitud de red, y de este modo permitirían la comparación entre diferentes sistemas de acueducto. Se plantea además la posibilidad de implementar en el mediano y largo plazo, el uso de indicadores como el índice de fugas en infraestructura (ILI), el cual es un indicador de desempeño de pérdidas técnicas que ha sido utilizado en más de 50 países y actualmente es reconocido como el mejor indicador de gestión de pérdidas técnicas, sin embargo, su cálculo requiere de un esfuerzo considerable para obtener la información necesaria para su estimación.

Otro índice utilizado a nivel internacional es el **Volumen de pérdidas por suscriptor por mes o Índice de Pérdidas de Agua por Usuario Facturado – IPUF**, el cual es un índice operacional expresado en metros cúbicos por suscriptor por mes y representa el volumen de agua perdida por suscriptor por mes sin discriminar si las pérdidas son técnicas o comerciales. En la Tabla 34 se presenta la variación del índice IPUF para Colombia entre los años 2007 a 2011 teniendo en cuenta una muestra de 13 empresas prestadoras, las cuales presentan consistencia en los datos reportados en el SUI en todos los años.

Tabla 34. Promedio de índice de pérdidas de agua por usuario facturado – IPUF entre 2007 y 2011

	Año				
	2007	2008	2009	2010	2011
IPUF (m ³ /suscriptor/mes)	15,4	14,5	14,3	14,4	14,3

Fuente: Elaboración propia a partir de CRA (2013)

El índice IPUF en el año 2011 para una muestra de 33 empresas prestadoras con niveles de micromedición superior al 80% es presentado en la Figura 37. El valor promedio del índice fue de 11,3 m³/suscriptor/mes con un rango intercuartil entre 6,7 y 13,9 m³/suscriptor/mes. El nuevo marco tarifario establece que se deben alcanzar valores menores o iguales a 6 m³/suscriptor/mes (estándar de eficiencia), asimismo establece que todas las personas prestadoras deberán presentar un plan de reducción de pérdidas detallado.

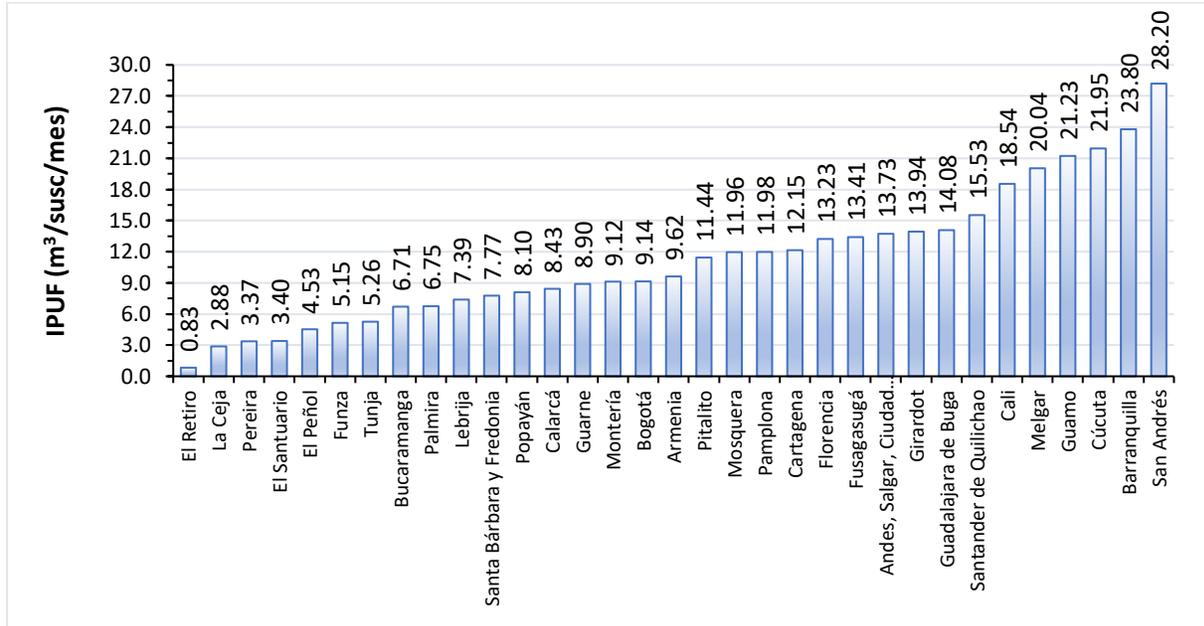


Figura 37. IPUF para empresas prestadoras en 33 municipios con niveles de micromedición superior al 80% en el año 2011
Fuente: CRA (2013)

En conclusión, la tendencia general que se reconoce a nivel nacional e internacional para disminuir los niveles de pérdidas de agua en el sector de agua potable y por ende mejorar las eficiencias, es que **se debe reevaluar el uso de indicadores porcentuales como el IANC** y se deben empezar a utilizar otro tipo de indicadores que relacionen un volumen de agua por suscriptor en un periodo de tiempo que puede ser mensual o anual, como es el caso del IPUF y evaluar la posibilidad de implementar otros como el ILI a mediano o largo plazo.

Es crucial establecer medidas dentro de las empresas prestadoras para reducir las pérdidas de agua, teniendo en cuenta los beneficios obtenidos no sólo en cuanto a suministro de agua potable para más usuarios y la reducción de enfermedades provenientes del agua, sino que también mitigaría problemas ambientales, se reduciría la presión sobre las fuentes de agua, se reducirían los costos de tratamiento de agua y bombeo y finalmente, se incrementarían los ingresos generados por las empresas de servicios públicos (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) & VAG-Armaturen GmbH, 2011).

6.1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS PROBLEMAS DE EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

De acuerdo con lo encontrado en este diagnóstico, se han identificado factores que influyen significativamente en la eficiencia del agua en el sector agua potable, los cuales se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35. Factores identificados para el sector agua potable

TECNOLÓGICO	ECONÓMICO	POLÍTICO	AMBIENTAL	SOCIAL
Operación y mantenimiento de sistemas de acueducto	Marco tarifario	Institucionalidad	Disponibilidad hídrica	Cultura del agua
Diseño y construcción de sistemas de acueducto	Costos de operación y mantenimiento	Instrumentos económicos	Inestabilidad del terreno	Capacitación
		Inversión por parte del Estado		

La **operación y mantenimiento, así como la vigilancia y control de pérdidas**, son elementos críticos a la hora de hablar de eficiencia del agua en el sector agua potable. El estado de las redes de distribución de agua potable es un factor importante en la prestación adecuada del servicio de acueducto. Si las redes están en mal estado o construidas con materiales obsoletos, es mucho más probable que se presenten fugas que incrementen los niveles de agua no facturada y los costos de operación de los sistemas de acueducto. Además, es posible que, por el mal estado de las redes, el agua que reciben los usuarios sea de menor calidad, pues puede ser contaminada por filtraciones o residuos en las tuberías. De este modo, **en municipios donde se presenta un mal estado en las redes de distribución, no hay un adecuado control de fugas y no se informa sobre estos daños, los costos de tratamiento del agua generalmente son muy altos y el desperdicio del recurso hace que menos usuarios reciban el suministro** (Unicef, 2006).

Cuadro 10. Caso de éxito. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga .

Caso acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB, 2016; Boletín de Noticias, 2017)
<p>Para el año 2016, el acueducto Metropolitano de Bucaramanga presentó el menor Índice de Agua No Contabilizada –IANC- y una continuidad en la prestación del servicio de 24 horas al día. El IPUF fue de 4,61 m³, con una reducción de 0,60 m³/mes respecto al año 2015, lo cual se logró con la ejecución de cuatro programas: reposición de redes, control de presiones, renovación en la micromedición e implementación de un sistema de control y monitoreo SCADA, el cual contempla el monitoreo y control del sistema de abastecimiento.</p> <p>Esto evidencia la importancia de la adopción de medidas por parte de las empresas prestadoras para mejorar los niveles de eficiencia del recurso hídrico.</p>

Por otro lado, la **institucionalidad**, definida como el “*Conjunto de organismos públicos y privados, instrumentos legales y financieros, de infraestructura y de articulación interna y externa, que se da la*

sociedad civil y el Estado para actuar en un determinado ámbito”, (“Institucionalidad,” n.d.) es un factor que incide de manera importante dentro del sector agua potable y que puede ser fortalecido a través de la mejora de **las capacidades del personal, una adecuada administración y la articulación entre las diferentes instituciones**. En el documento Conpes 3463 “Planes departamentales de agua y saneamiento para el manejo empresarial de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo” se identifican las siguientes limitaciones dentro del sector: **estructura dispersa de la industria y desaprovechamiento de economías de escala**⁹³; **desarticulación de las diferentes fuentes de recursos; planificación y preinversión deficiente**, que resulta en **inversiones atomizadas, falta de integralidad y de visión regional; limitado acceso a crédito; y lentitud en los procesos de modernización empresarial** (MAVDT & DNP, 2007) (Vélez Londoño, 2013).

Como respuesta a estas dificultades se plantearon los Planes Departamentales de Agua (PDA) con el fin de crear esquemas regionales de prestación con operadores especializados para aprovechar las economías de escala y mejorar la asignación y destinación de los recursos aportados por el Estado. Los aportes por parte de los municipios a los PDA no son obligatorios, sin embargo a manera de **incentivo financiero**, el Gobierno Nacional asigna apoyo destinado a proyectos de inversión en el sector, únicamente a los municipios que estén integrados a los PDA (Salinas Ramírez, 2011).

La capacitación es un factor muy ligado a la institucionalidad, ya que desde las empresas prestadoras se debe contar con personal capacitado en la operación, mantenimiento, vigilancia, control de pérdidas, administración y cobertura del servicio de acueducto. Cuando el personal está capacitado para operar de manera adecuada las plantas de potabilización así como de realizar las diferentes labores que abarca este sector, la eficiencia del agua aumentará, las pérdidas de agua serán menores, logrando de este modo una reducción en los costos para producir y distribuir agua potable. Así mismo, **debe existir una capacitación no sólo del personal directivo, administrativo, técnico y operativo de las empresas prestadoras de servicio, sino también de los usuarios**, para que éstos aprendan a identificar irregularidades en el sistema de abastecimiento, como fugas o daños en tuberías (Pimienta, 2013).

Por otro lado, el **marco tarifario**, es un factor de gran relevancia dentro de la normatividad, y mediante el cual se regulan los precios del agua para las diferentes empresas prestadoras de servicios y también con el cual se busca mejorar la eficiencia de las empresas en sus costos administrativos y operativos, así como disminuir las pérdidas de agua en los sistemas y fortalecer la planeación de inversiones (País, 2016). Desde este instrumento normativo se pueden regular temas de gran relevancia para mejorar la eficiencia en la prestación de los servicios de acueducto, por ejemplo, el establecimiento de un nivel de pérdidas aceptable en los sistemas de acueducto.

Otro factor que incide tanto en la cobertura, como en el correcto funcionamiento de los sistemas de acueducto es la **inversión**, tanto por parte del Estado como de otras entidades públicas y privadas. El Sistema General de Participaciones - SGP financia alrededor del 40% de la inversión, pero en muchos casos su **aplicación es ineficiente y no está articulada a planes integrales y óptimos de inversión** (DNP & MAVDT, 2005). Para el caso de los recursos aportados por el SGP, se han identificado los siguientes problemas en su aplicación: *“desarticulación de planes integrales de inversión y de los planes de las E.S.P., desvío de recursos por fuera del sector, inversiones dispersas e incompletas debido a la segmentación de los recursos por vigencias presupuestales anuales y el deficiente acceso a crédito y atomización y*

⁹³ Economía de escala en los servicios públicos: disminución de costos unitarios al aumentar el número de suscriptores.

asimetrías en la distribución geográfica de los recursos con relación a las necesidades” (MAVDT & DNP, 2007).

En los municipios de más de 10 mil habitantes, el instrumento financiero utilizado es la tarifa, a través de la cual se cubren gastos administrativos, de operación, inversión y ambientales de la prestación de servicios. Adicionalmente, **los proyectos de inversión se complementan con recursos de las transferencias de la Nación y apoyos adicionales del Gobierno Nacional.**

Por otro lado, **en los municipios con menos de 10 mil habitantes, los recursos económicos de financiamiento dependen de las transferencias del sector central y de los apoyos del Gobierno Nacional y Departamental**, ya que en algunos casos no se cobra el servicio o la tarifa no cubre los costos requeridos, conllevando la inviabilidad financiera de estos prestadores, generalmente localizados en zonas de muy bajo ingreso y pobre desarrollo institucional. Por esta razón, un alto porcentaje de estos municipios (71%) se caracterizan por tener un riesgo financiero alto de acuerdo con la clasificación definida por la CRA (Salinas Ramírez, 2011).

En cuanto a **disponibilidad hídrica**, en Colombia, la mayor parte del agua que abastece los sistemas de acueducto proviene de fuentes superficiales. De acuerdo con los análisis de los reportes de fuentes de abastecimiento de los pequeños prestadores, se ha determinado que el 93,9% tienen como principal fuente de abastecimiento ríos y quebradas para alimentar sus sistemas de acueducto; otro 3,3% hace captación de embalses y lagunas mientras que el 2,8% realiza la toma del recurso hídrico de acuíferos y fuentes subterráneas (SSPD, 2014b).

La variabilidad climática y el cambio climático han incidido en los últimos tiempos sobre las fuentes hídricas del país, causando problemas de desabastecimiento y racionamiento en algunas zonas durante eventos como el fenómeno de El Niño. Por ejemplo, para el periodo 2014-2016, **296 municipios en 25 departamentos fueron afectados por racionamiento y 237 municipios en 25 departamentos fueron afectados por desabastecimiento parcial de agua.** Los impactos en la prestación del servicio de agua potable fueron significativos en la región Andina y Caribe, donde se registraron los mayores déficits de lluvia, siendo los departamentos más afectados en materia de desabastecimiento de agua potable, la Guajira, Magdalena y Caldas. (UNGRD, 2016).

De este modo, la abundancia hídrica de Colombia se caracteriza por los contrastes existentes en la disposición de recursos hídricos a nivel regional, más específicamente en las cinco áreas hidrográficas del país, las cuales presentan grandes diferencias que repercuten en la vulnerabilidad tanto del sistema natural como de la estructura socioeconómica (UNGRD, 2016). Por tal razón la gestión del agua y la implementación de medidas para mejorar su eficiencia debe ser abordada de manera particular teniendo en cuenta el contexto y ámbito de aplicación.

6.2 REÚSO

Las aguas residuales tratadas pueden ser reutilizadas para una variedad de propósitos. Actualmente, la mayor parte del agua recuperada se utiliza para usos no potables, tales como irrigación agrícola y paisajística, sin embargo, también existe reúso en las actividades industriales y en menor medida para usos domésticos.

El uso de agua residual tratada para el suministro de agua potable se ha dividido históricamente en dos categorías: el reúso potable directo e indirecto. El primero se refiere a la introducción de aguas residuales

municipales tratadas en forma directa en el sistema de distribución de agua luego de un extenso monitoreo para asegurar que se cumpla en todo momento con los estrictos requerimientos de calidad. Por otro lado, el reúso potable indirecto sucede cuando los efluentes tratados son descargados de manera planeada a los cuerpos receptores para ser utilizados de forma intencional y controlada en algún uso benéfico. Se caracterizan por la presencia de un amortiguador ambiental entre el efluente de aguas residuales y el suministro de agua potable (AIDIS, 2016; National Academy of Sciences, 2012).

Para el caso de Colombia, el reúso de agua residual tratada en el sector de agua potable no está permitido de acuerdo con la Resolución 1207 de 2014. Sin embargo, a nivel internacional existen diversas experiencias en las cuales se ha llevado a cabo este tipo de prácticas, obteniendo resultados positivos.

En el Cuadro 11 se presentan dos casos internacionales en los cuales se hace reúso de agua para fines potables tanto de forma directa como indirecta. Para ambos casos **la práctica de reúso surgió ante situaciones de escasez y de una fuerte presión sobre el recurso hídrico**, lo que motivó a buscar alternativas con las cuales hoy en día se abastecen dos poblaciones, al mismo tiempo que se reducen los impactos negativos sobre las fuentes de agua superficiales.

Cuadro 11. Casos de éxito. Reúso de agua para uso potable.

Reúso potable directo (Australian Water recycling Centre of Excellence, 2014a)	Reúso potable indirecto (Australian Water Recycling Centre of Excellence, 2014)
<p>En Namibia se encuentra la planta de recuperación de aguas residuales de Windhoek, que es la planta de reúso potable directo más grande del mundo. Una combinación de factores (económicos, climáticos, de disponibilidad de agua, entre otros) obligó a la compañía de agua en Windhoek a buscar alternativas para satisfacer la demanda de agua potable, por lo cual se puso en marcha el desarrollo de esta planta, la cual actualmente suministra 20820 m³/día de agua potable de alta calidad a una población de alrededor de 350.000 residentes de la misma ciudad. Dependiendo de la demanda estacional, entre el 35 y 50% del agua regenerada se utiliza para aumentar el suministro de agua superficial. El agua purificada también se utiliza para la recarga del acuífero y el riego. El sistema de tratamiento emplea un enfoque de barrera múltiple que combina nueve procesos de tratamiento desde la adquisición de agua de origen hasta el suministro de agua en el grifo del consumidor. Algunos de estos procesos son: tratamiento convencional, microfiltración, pre-ozonación y cloración. Los costos de diseño y construcción fueron estimados en 12,5 millones de euros.</p>	<p>Durante la década de 1960, la cuenca Occoquan (Estados Unidos) experimentó una rápida transformación del crecimiento de una región en gran parte rural a una región predominantemente urbana que resultó en el deterioro de la calidad del agua del embalse de Occoquan, que suministraba agua potable al norte de Virginia. En 1971, se adoptó la Política de Occoquan que establecía la creación de una agencia regional para proporcionar tratamiento avanzado para todas las aguas residuales generadas en la cuenca; y una organización independiente, para monitorear continuamente la cuenca y brindar asesoramiento sobre medidas de protección para el Embalse. Actualmente las aguas residuales tratadas son descargadas en el embalse de Occoquan que es utilizado como afluente para la planta de agua potable del condado de Fairfax en Griffith que proporciona agua potable a una población de aproximadamente 321.000 habitantes. El sistema tuvo una inversión inicial de aproximadamente 80 millones de dólares y fue financiado a través de subvenciones federales (70-80%) y emisión de bonos (20-30%).</p>

Carrera

Estas experiencias demuestran la posibilidad de llevar a cabo prácticas de reúso dentro del sector agua potable en lugares con escasez de agua y donde se presenten problemas graves de contaminación de las fuentes de las cuales se abastecen.

7 SECTOR INDUSTRIAL MANUFACTURERO

En este sector se hace referencia a los establecimientos industriales cuya actividad productiva principal se encuentra incluida en la sección C – Industrias Manufactureras, divisiones 10 a 33 de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme Adaptada para Colombia – CIIU Rev. 4 AC (Anexo 3) estas divisiones se subdividen en 76 Grupos y estos a su vez en 149 Clases, en la Figura 38 se muestra un ejemplo de esta clasificación. Es de aclarar que el sacrificio de bovinos, porcinos y aves se encuentra clasificado en la División 10, Grupo 101, Clase 1011 “Procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos” por lo que su análisis hace parte del sector industrial, mientras que el proceso de “Cría y levante” se incluye en el sector pecuario.

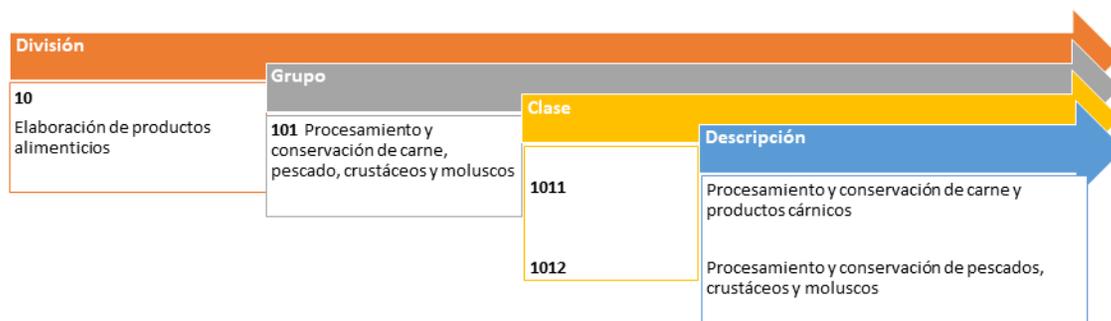


Figura 38 Ejemplo de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme Adaptada para Colombia – CIIU Rev. 4 AC

Fuente: Elaboración propia

7.1 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD

En la Figura 39 se presenta el esquema conceptual del uso del agua en el sector industrial manufacturero. El volumen de agua que ingresa al proceso industrial y que es requerida para el proceso productivo, puede provenir de una fuente superficial, subterránea, acueducto u otra fuente. El agua que no es incorporada en el producto hace parte del volumen que sale del proceso y que puede ser ingresado nuevamente como un volumen de recirculación, y según los requerimientos de calidad del agua, podría involucrar un tratamiento previo. El volumen de agua que sale del proceso se convierte en el afluente de la PTAR o bien, puede ser reutilizada por un sector diferente o también, ser vertida a una fuente superficial o al alcantarillado, cumpliendo con los estándares de calidad establecidos en la normativa.

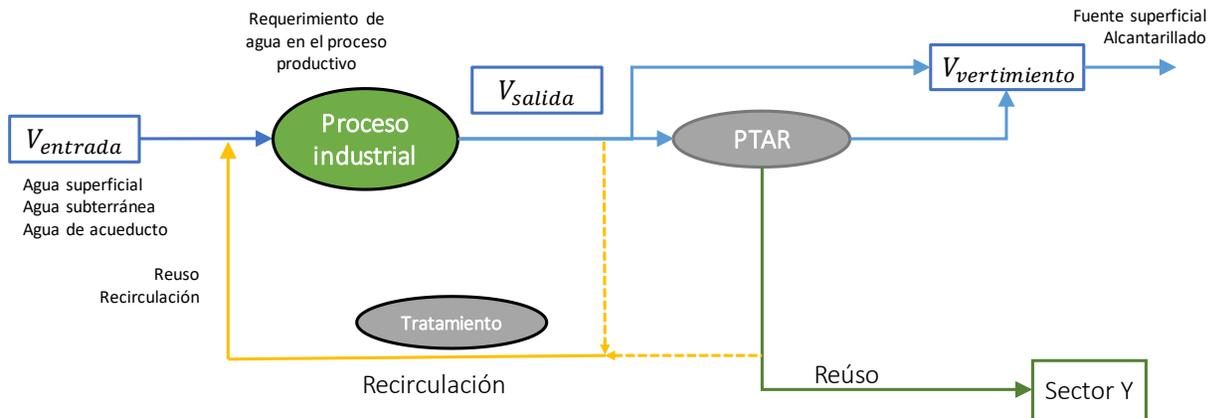


Figura 39. Esquema de uso del agua en el sector industrial
Fuente: Elaboración propia

En Colombia, el 71,9% de los establecimientos industriales manufactureros están ubicados en las áreas metropolitanas de Bogotá D.C., Medellín-Valle de Aburrá y Cali, y el 14,1% se concentra en Barranquilla, Bucaramanga, Pereira, Manizales, Cartagena y Cúcuta (DANE, 2015b) (Figura 40). Esta distribución industrial en el país ha sido similar a la presentada en los años 2013 y 2014 (DANE, 2013b, 2014b).

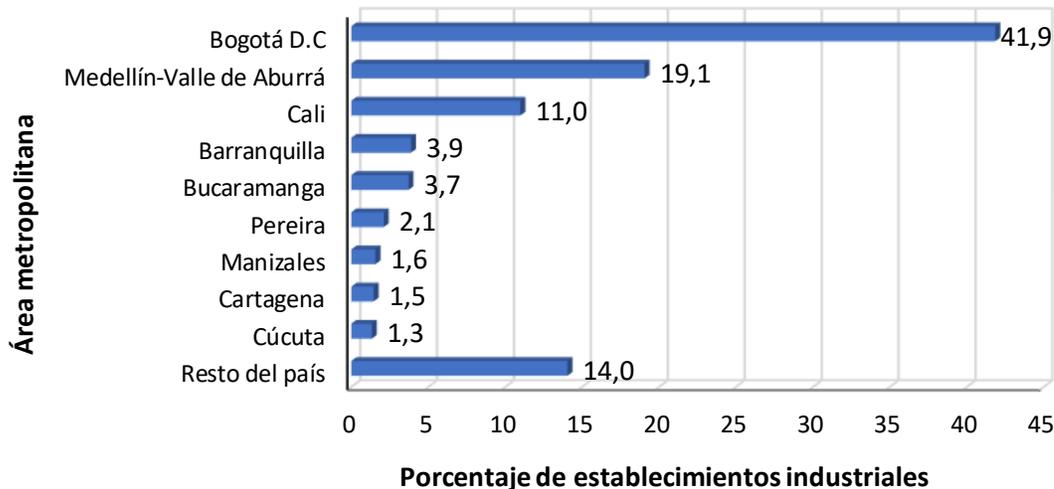


Figura 40. Distribución porcentual de los establecimientos industriales por áreas metropolitanas. Total nacional para el año 2015
Fuente: EAM 2015 (DANE, 2015b)

De los 76 Grupos industriales clasificados en CIU Rev. 4 A.C., ocho concentraron el 50,1% de los establecimientos. Dentro de estos grupos los que registraron el mayor número de establecimientos industriales en el país para el año 2015, fueron: confección de prendas de vestir, excepto prendas de piel (10,3%), elaboración de otros productos alimenticios (8,4%) y fabricación de productos de plástico (7,1%). (Tabla 36). La totalidad de los grupos industriales puede ser consultados en el Anexo 3.

Tabla 36. Grupos industriales que concentran el mayor número de establecimientos en Colombia (>50,1%) según CIU Rev. 4 A.C. 2015

Grupo industrial. CIU Rev. 4	Número de establecimientos	%	Descripción del grupo industrial
Total	4883	50,1	8 grupos
141	928	10,3	Confección de prendas de vestir, excepto prendas de piel
108	756	8,4	Elaboración de otros productos alimenticios
222	636	7,1	Fabricación de productos de plástico
181	525	5,8	Actividades de impresión y actividades de servicios relacionados con la impresión
239	441	4,9	Fabricación de productos minerales no metálicos n.c.p.
202	432	4,8	Otros productos químicos
259	416	4,6	Otros productos elaborados de metal y servicios relacionadas con metales
311	375	4,2	Fabricación de muebles

Fuente: Elaboración propia. Modificado EAM 2015 (DANE, 2015b)

De la demanda hídrica nacional, según el ENA 2014, **el sector industrial usó el 5,9% equivalente a 2.106,0 millones de metros cúbicos siendo el quinto sector con mayor demanda hídrica.** En este mismo estudio reportan que el volumen de retorno para el uso industrial fue de 2.000,7 millones de metros cúbicos que equivalen al 28,4% y un volumen de pérdidas de 493,5 millones metros cúbicos (IDEAM, 2015a).

En la Tabla 37 se presenta la distribución del uso del agua para el sector industrial en Colombia, dividido por área hidrográfica. Se observa que **la mayor demanda de agua en el sector industrial en el año 2012 se produjo en el AH del Magdalena Cauca donde la demanda fue de 252,52 millones de metros cúbicos, correspondiente al 97,29% de la demanda total del sector,** esta demanda se realizó principalmente en las SZH: Arroyohondo – Yumbo - Mulalo-Vijes, Yotoco, Mediacanoa y Piedras, Bogotá, Palo, Ciénaga de Mayorquín y Porce. En el AH del Caribe se demandaron 5,62 millones de metros cúbicos (2,17%) siendo la segunda AH en mayor consumo. En las AH del Orinoco, Pacífico y Amazonas, la demanda del sector fue menor al 0,50%, resaltando que en el AH del Amazonas no se demandó agua para el sector industrial manufacturero.

Tabla 37. Distribución del uso de agua para el sector industrial por Área Hidrográfica. En paréntesis se indica el porcentaje demandado respecto a la demanda total del sector

Uso del agua	Área hidrográfica					Total
	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico	
	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³
Sector Industrial	5,62	252,52	1,30	0,0	0,11	259,55
	(2,17%)	(97,29%)	(0,50%)	(0,0%)	(0,04%)	(100%)

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

Nota: Mm³ – millones de metros cúbicos

Según la información suministrada por los establecimientos industriales para los años 2013⁹⁴, 2014⁹⁵ y 2015⁹⁶ y que fue reportada en la EAM del DANE para los mismos años (DANE, 2013a, 2014a, 2015a), el volumen de agua demandada por la industria manufacturera fue de 273,9 millones de metros cúbicos en el 2013, y de 289,4 millones de metros cúbicos y 288,1 millones de metros cúbicos para el 2014 y 2015 respectivamente. De la cual, la principal fuente de captación fue el agua superficial (60,3%) seguida de la agua suministrada por las empresas de acueducto y el uso de agua subterránea. En Tabla 38 se presenta la distribución porcentual de las fuentes de abastecimiento usadas por los establecimientos industriales.

Aunque el agua suministrada por las empresas de acueducto representa un porcentaje importante en el abastecimiento de agua en el sector industrial, según el Informe Sectorial de Acueducto y Alcantarillado (SSPD, 2015), para el año 2014, sólo el 0,09% de los suscritos al servicio de acueducto de los grandes prestadores corresponden al sector industrial (Figura 41). Indicando que este sector no representa una presión importante para el agua potable generada en el sector agua potable y saneamiento básico.

Tabla 38. Demanda de agua y tipos de fuentes de abastecimiento usadas por los establecimientos industriales manufactureros 2013 a 2015

Año	Demanda de agua (Mm ³)	Fuente de captación			
		Aguas superficiales	Agua suministrada por empresas de acueducto	Agua subterránea	Otras captaciones
2012 ⁹⁷	259,55	SD	SD	SD	SD
2013	273,9	59,5%	22,5%	16,9%	1,1%
2014	289,4	60,5%	21,6%	16,7%	1,2%
2015	288,1	60,8%	21,3%	16,7%	1,2%
Promedio	277,7	60,3%	21,8%	16,7%	1,2%

Fuente: Elaboración propia a partir de (DANE, 2013a, 2014a, 2015a)

Nota: Otras captaciones incluye lluvia, agua de mar y agua en carro tanque. SD: sin información. Mm³ – millones de metros cúbicos

⁹⁴ Datos obtenidos a partir de una muestra de 2.985 establecimientos industriales, que representan un universo de 11.126 establecimientos.

⁹⁵ Datos obtenidos a partir de una muestra de 3.070 establecimientos industriales, que representan un universo de 9.516 establecimientos.

⁹⁶ Datos obtenidos a partir de una muestra de 3.041 establecimientos industriales, que representan un universo de 9.486 establecimientos.

⁹⁷ Dato obtenido del ENA 2014 (IDEAM, 2015a).

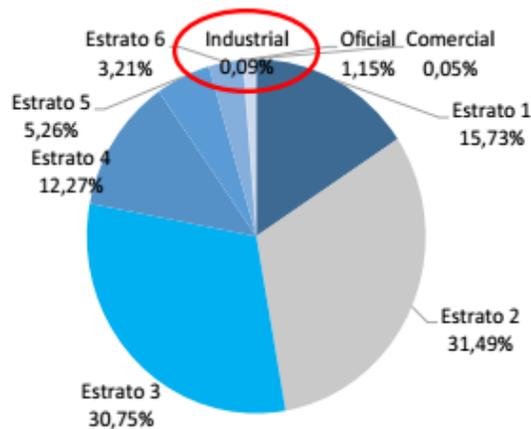


Figura 41. Suscriptores por uso y estrato para el servicio de acueducto
Fuente: (SSPD, 2015)

Para poder realizar una priorización del sector, se analizaron, con la información y nivel de detalle disponible, las clases industriales que realizan mayor presión sobre el recurso hídrico, es decir las clases industriales de mayor demanda de agua, mayor volumen de agua vertida y mayores cargas contaminantes generadas.

Es de aclarar que, con la información analizada de las Encuestas Anuales Manufactureras (EAM) y Encuesta Ambiental Industrial (EIA), no fue posible obtener un mayor nivel de detalle sobre los usos del agua a nivel de Clase industrial debido a las reservas de información estadística. A pesar de contar con la información del RUA desde el 2012 hasta el 2016 la cual presenta un mayor nivel de detalle de clasificación (Clases industriales) se optó por usar la información del DANE por su mayor precisión, ya que la información del RUA presenta algunos datos inconsistentes, por ejemplo, se encontraron registros de industrias donde el caudal vertido o tratado superaba en más de un orden de magnitud el caudal captado. Además, presenta un mayor número de reportes de industrias que captan agua comparado con el total de reportes de industrias que realizan vertimientos y que tratan el agua, por lo que su comparación no es adecuada. Mientras que la información del DANE si permite realizar una comparación entre estos diferentes volúmenes y además permite realizar una comparación anual entre industrias debido a la metodología que implementan⁹⁸.

En la Tabla 39, Tabla 40y en la Figura 42 se presentan los volúmenes de agua usados y vertidos por los grupos de Divisiones industriales para los años 2013 a 2015 (DANE, 2013a, 2014a, 2015a). Una mayor descripción de las divisiones correspondientes en cada agregación puede ser consultada en el Anexo 3.

Las industrias clasificadas en el sector de Alimentos, bebidas y tabaco fueron las que presentaron un mayor consumo agua entre los años 2013 a 2015, seguidos de la Fabricación de papel y actividades de edición e impresión, y Fabricación de sustancias y productos químicos; estas tres agregaciones de grupos industriales utilizaron más del 73,1% del volumen total de agua del sector. Igualmente, estos tres grupos de sectores industriales fueron los de mayor generación de volumen de agua residual, vertiendo más del 72,8% del total del sector.

⁹⁸ Para hacer comparables los resultados de cada año con el período anterior, el DANE implementa una metodología de panel, mediante la cual se identifican las empresas que deben formar parte de la comparación en los años de reporte (DANE, 2015a).

Tabla 39. Volumen de agua total captada en el sector, según agregación de divisiones industriales

Agregación de divisiones industriales. (código de los grupos)	2013		2014		2015	
	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%
Alimentos, bebidas y tabaco (10, 11 y 12)	102,59	36,8	110,89	38,3	108,42	37,6
Fabricación, transformación y producción de papel y productos de madera (16, 17 y 18)	62,02	22,2	64,10	22,1	63,65	22,1
Fabricación de productos químicos y sustancias (20 y 21)	39,28	14,1	39,84	13,8	38,90	13,5
Procesamiento y refinación de productos del petróleo (19)	27,64	9,9	27,54	9,5	26,81	9,3
Textiles, confección, calzado y pieles (13, 14 y 15)	21,77	7,8	22,60	7,8	25,42	8,8
Industrias de otros productos minerales no metálicos (23)	11,65	4,2	9,59	3,3	10,65	3,7
Metalurgia y fabricación de productos metálicos (24 y 25)	8,50	3,1	8,94	3,1	8,57	3,0
Otras divisiones industriales (divisiones industriales 29, 31, 32, 33, 34, 35 y 36)	3,42	1,2	3,78	1,3	3,50	1,2
Fabricación de productos de caucho y de plástico (22)	2,07	0,7	2,17	0,8	2,14	0,7
Total	278,93		289,45		288,05	

Fuente: Elaboración propia a partir de DANE, (2013a, 2014a, 2015a)

Tabla 40. Volumen total de agua vertida por el sector, según agregación de divisiones industriales.

Agregación de divisiones industriales. (código de los grupos)	2013		2014		2015	
	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%
Fabricación, transformación y producción de papel y productos de madera (16, 17 y 18)	56,62	30,6	59,14	31,8	58,82	31,7
Alimentos, bebidas y tabaco (10, 11 y 12)	50,30	27,1	52,36	28,1	52,01	28,1
Fabricación de productos químicos y sustancias (20 y 21)	27,96	15,1	29,51	15,8	27,94	15,1
Textiles, confección, calzado y pieles (13, 14 y 15)	17,03	9,2	19,58	10,5	22,57	12,2
Procesamiento y refinación de productos del petróleo (19)	16,28	8,8	11,96	6,4	16,12	8,7
Metalurgia y fabricación de productos metálicos (24 y 25)	8,64	4,7	4,93	2,6	5,07	2,7
Industrias de otros productos minerales no metálicos (23)	4,30	2,3	3,91	2,1	3,15	1,7
Otras divisiones industriales (divisiones industriales 29, 31, 32, 33, 34, 35 y 36)	2,70	1,5	3,08	1,7	2,91	1,6
Fabricación de productos de caucho y de plástico (22)	1,45	0,8	1,73	0,9	1,60	0,9
Total	185,28		186,20		190,18	

Fuente: Elaboración propia a partir de DANE, (2013a, 2014a, 2015a)

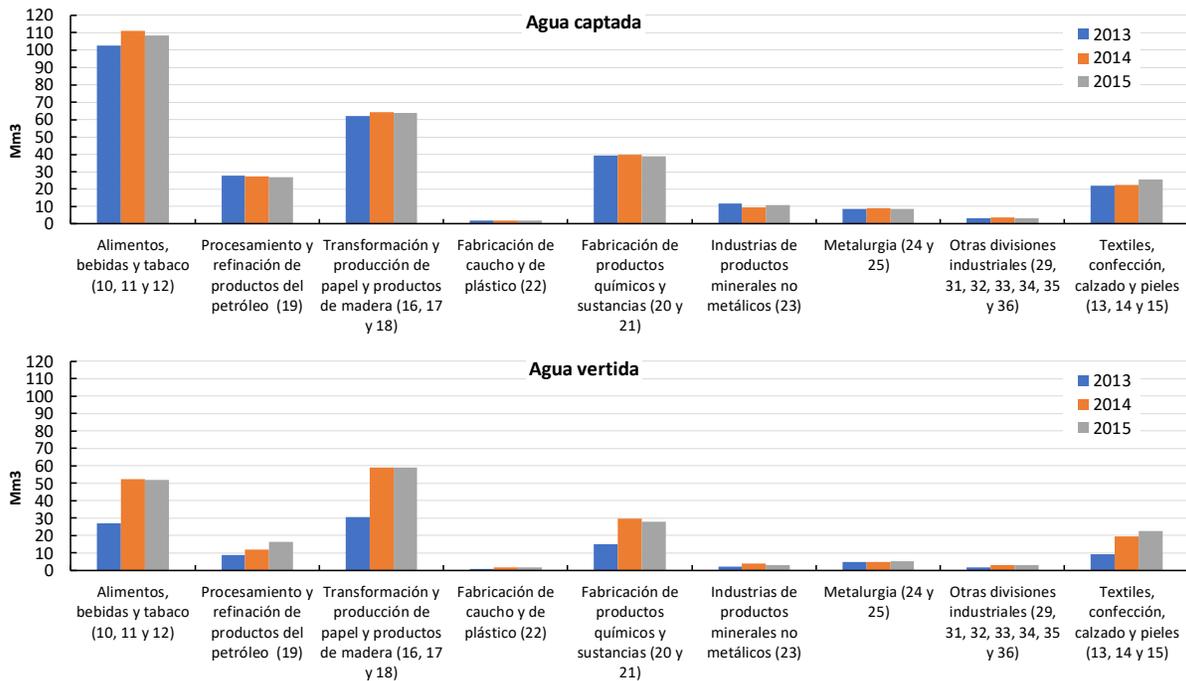


Figura 42. Volumen total de agua captada y vertida (millones de metros cúbicos) por el sector, según grupos de divisiones industriales entre el 2013 y 2015.

Una vez identificadas las divisiones industriales con mayor volumen de agua captado y vertido, entre los años 2013 a 2015, se optó por utilizar el registro del RUA para el año 2016 y así poder identificar las Clases industriales que captan un volumen de agua superior al promedio industrial de ese año y pertenecientes a las Divisiones mencionadas anteriormente. Su descripción y codificación (CIU Rev. 4 A.C. 2015) es mostrada en la Tabla 41.

Tabla 41. Clases industriales que fueron identificadas por realizar una captación superior al promedio total del sector (157.327 m³/año).

CIU 4AC	Descripción de la Clase industrial según CIU Rev. 4 A.C. 2015	Volumen captado m ³ /año
1103	Producción de malta, elaboración de cervezas y otras bebidas malteadas	1'597.688
1071	Elaboración y refinación de azúcar	1'192.266
1701	Fabricación de pulpas (pastas) celulósicas; papel y cartón	1'092.062
1051	Elaboración de productos de molinería	383.370
1052	Elaboración de almidones y productos derivados del almidón	323.912
1063	Otros derivados del café	301.904
1104	Elaboración de bebidas no alcohólicas, producción de aguas minerales y de otras aguas embotelladas	218.507
1089	Elaboración de otros productos alimenticios n.c.p.	214.037

Fuente: Elaboración propia a partir de RUA 2016

En cuanto a cargas contaminantes, y a partir de la información reportada en el RUA 2012⁹⁹, se analizaron las Clases industriales que más generaron vertimientos contaminantes, considerando como principales contaminantes¹⁰⁰ los parámetros DBO y DQO como indicadores de la materia orgánica, los sólidos suspendidos totales (SST), los nutrientes fósforo total (PT) y nitrógeno total (NT), y los metales pesados cadmio, zinc, cobre, cromo hexavalente, mercurio y plomo. Para seleccionar las Clases industriales que producen mayores vertimientos contaminantes, primero se calculó el promedio de cada contaminante para las 560 industrias, luego y agrupando en las 87 Clases industriales del CIU, se seleccionaron aquellas Clases cuyo valor medio de concentración contaminante fuera superior al promedio obtenido utilizando todas las industrias del registro. El resultado de esta selección es presentado en la Tabla 42, Tabla 43 y Tabla 44.

El conocimiento de estas descargas contaminantes aportó a la priorización de las actividades industriales ya que no sólo se consideraron los volúmenes de uso del agua (captado y vertido), sino también la calidad de los vertimientos.

Tabla 42. Principales Clases industriales en Colombia que generan mayores vertimientos contaminantes por DBO₅, DQO y sólidos suspendidos totales (SST).

CIU 4AC	Descripción de la clase industrial según CIU Rev. 4 A.C. 2015	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
2910	Fabricación de vehículos automotores y sus motores	3520964,4	1841571,8	1029762,13
1701	Fabricación de pulpas (pastas) celulósicas; papel y cartón	1744615,5	299091,6	647897,15
2012	Fabricación de abonos y compuestos inorgánicos nitrogenados	1414625,1	560754,0	216848,70
1311	Preparación e hilatura de fibras textiles	1330357,1	407471,0	114542,75
1103	Producción de malta, elaboración de cervezas y otras bebidas malteadas	484292,3	224882,4	123919,22
1312	Tejeduría de productos textiles	370405,6	75938,9	85324,81
1071	Elaboración y refinación de azúcar	274417,8	131321,1	72852,79
1020	Procesamiento y conservación de frutas, legumbres, hortalizas y tubérculos	259019,9	37290,6	11230,51
2731	Fabricación de hilos y cables eléctricos y de fibra óptica	177648,2	68836,1	47346,79
1040	Elaboración de productos lácteos	174033,3	53736,2	19776,41
1072	Elaboración de panela	150646,5	56304,3	3434,73
1089	Elaboración de otros productos alimenticios n.c.p.	107038,9	46417,8	35312,42
2029	Fabricación de otros productos químicos n.c.p.	101939,5	26317,4	14079,22
1702	Fabricación de papel y cartón ondulado (corrugado); fabricación de envases, empaques y de embalajes de papel y cartón.	93361,2	43348,7	37499,4

⁹⁹ Se obtuvo información del RUA de los años 2012 al 2016, suministrada por el IDEAM. Sin embargo, solo la correspondiente al año 2012 cuenta con la información de caracterizaciones de los vertimientos de aguas residuales. Esta base de datos, tiene un registro de 560 industrias manufactureras las cuales se agrupan en 87 Clases industriales según CIU Rev 4 A.C 2015. y pueden reportar de un total de 76 variables fisicoquímicas y microbiológicas, los parámetros que les son exigidos por la Autoridades Ambientales Competentes o los parámetros que tengan disponible para reporte.

¹⁰⁰ La DBO y la DQO son importantes porque indican la contaminación por materia orgánica e inorgánica, además la DBO junto con los SST son los parámetros de control en el cobro de tasas retributiva. Los metales pesados seleccionados son recomendados por el IDEAM como de interés sanitario debido a su potencial tóxico. El nitrógeno total y el fósforo total son nutrientes de importancia por los efectos de eutrofización en cuerpos de agua.

CIU 4AC	Descripción de la clase industrial según CIU Rev. 4 A.C. 2015	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
1709	Fabricación de otros artículos de papel y cartón	55803,7	74610,8	57627,3
2393	Fabricación de otros productos de cerámica y porcelana	4287,5	1978,8	164320,4
2395	Fabricación de artículos de hormigón, cemento y yeso	2580,4	1259,4	104666,3

Fuente: Elaboración propia a partir del RUA 2012

Nota: Se resaltan los valores que superan la concentración promedio de cada contaminante del total de las industrias.

Tabla 43. Principales Clases industriales en Colombia que generan mayores vertimientos contaminantes por metales pesados (cadmio, zinc, cobre, cromo y total, plomo y mercurio)

CIU 4AC	Descripción de la clase industrial según CIU Rev. 4 A.C. 2015	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Pb (mg/L)	Hg (mg/L)
1312	Tejeduría de productos textiles	18,9	24,2	123,9	134,7	134,7	5,1
1311	Preparación e hilatura de fibras textiles	31,5	1,0	299,5	224,7	314,0	
1701	Fabricación de pulpas (pastas) celulósicas; papel y cartón	493,5		1351,7	838,2		6,9
2910	Fabricación de vehículos automotores y sus motores	243,8	1,3	4062,6	4062,6	11373,6	325,0
1391	Fabricación de tejidos de punto y ganchillo	6,6	22,1	362,5	40,6	8,5	
1702	Fabricación de papel y cartón ondulado (corrugado); fabricación de envases, empaques y de embalajes de papel y cartón.	8,7	137,6	409,8	38,5	34,3	0,5
1071	Elaboración y refinación de azúcar			57,9	1,9	148,5	0,7
1511	Curtido y recurtido de cueros; recurtido y teñido de pieles				492,4		
2012	Fabricación de abonos y compuestos inorgánicos nitrogenados		684,3				

Fuente: Elaboración propia a partir del RUA 2012

Nota: Se resaltan los valores que superan la concentración promedio de cada contaminante del total de las industrias.

Tabla 44. Principales clases industriales en Colombia que generan mayores vertimientos contaminantes por los nutrientes: nitrógeno total y fósforo total

CIU 4AC	Descripción de la Clase industrial según CIU Rev. 4 A.C. 2015	Nitrógeno total (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
1701	Fabricación de pulpas (pastas) celulósicas; papel y cartón	668353,5	
2012	Fabricación de abonos y compuestos inorgánicos nitrogenados	331759,3	83196,8
1089	Elaboración de otros productos alimenticios n.c.p.	304478,5	

Fuente: Elaboración propia a partir del RUA 2012

Nota: Se resaltan los valores que superan la concentración promedio de cada contaminante del total de las industrias.

Una vez identificadas las agrupaciones de divisiones industriales que generan la mayor demanda de agua y el mayor volumen de vertimiento de agua residual durante los años 2012 a 2015 según la EAI y la EAM del DANE (Tabla 39 y Tabla 40), e identificar las Clases que hacen parte de estas agrupaciones (Tabla 41) se cruzó esta información con las Clases industriales que generan mayores concentraciones

contaminantes en sus procesos (Tabla 42, Tabla 43 y Tabla 44). A partir del análisis y del cruce de información se priorizaron las siguientes Clases industriales, las cuales son listadas en la Tabla 45. Según la información del RUA 2016, estas Clases industriales se encuentran ubicadas en los departamentos de: Antioquia, Atlántico, Bogotá D.C, Bolívar, Boyacá, Caldas, Casanare, Cauca, Cesar, Córdoba, Cundinamarca, La Guajira, Magdalena, Meta, Quindío, Risaralda, Santander, Tolima y Valle del Cauca.

Tabla 45. Clases industriales priorizadas en el sector por su mayor presión sobre el recurso hídrico

CIU 4AC	Descripción de la Clase industrial según CIU Rev. 4 A.C. 2015
1071	Elaboración y refinación de azúcar
1103	Producción de malta, elaboración de cervezas y otras bebidas malteadas
1311	Preparación e hilatura de fibras textiles
1312	Tejeduría de productos textiles
1701	Fabricación de pulpas (pastas) celulósicas; papel y cartón
1702	Fabricación de papel y cartón ondulado (corrugado); fabricación de envases, empaques y de embalajes de papel y cartón.
1709	Fabricación de otros artículos de papel y cartón
2012	Fabricación de abonos y compuestos inorgánicos nitrogenados
2029	Fabricación de otros productos químicos n.c.p.
2910	Fabricación de vehículos automotores y sus motores

Fuente: Elaboración propia

Para establecer la productividad física del agua en el sector industrial manufacturero, se requiere conocer la cantidad de agua captada y que es usada en el proceso productivo y la cantidad de producto generado. Debido a la poca información existente para poder calcular esta productividad física del agua, se optó por realizar un reporte de los módulos de consumo encontrados en la literatura de las clases industriales priorizadas.

En Colombia, algunas autoridades ambientales, han llevado a cabo estudios para definir módulos de consumo dentro de los diferentes sectores productivos y a partir de ellos otorgar las concesiones de agua en diferentes sectores productivos. Éstos módulos de consumo se refieren a la cantidad de agua que se requiere para el desarrollo de una actividad o la obtención de un producto, permitiendo de este modo determinar los caudales o volúmenes de aguas subterráneas o superficiales que se asignan a personas naturales o jurídicas para el desarrollo de sus actividades domésticas, agropecuarias, industriales, comerciales o de otro tipo (AMVA - UPB, 2010; Casas F, 2012). **El establecimiento de los módulos de consumo, es una estrategia que sirve para desincentivar los altos consumos de agua entre las empresas, al mismo tiempo que se definen los potenciales de ahorro y uso eficiente del recurso y mecanismos para incentivarlos** (Casas F, 2012).

En la Tabla 46 se presentan módulos de consumo establecidos por parte de algunas autoridades ambientales para diferentes procesos productivos en Colombia¹⁰¹.

¹⁰¹ Cornare mediante Resolución número 112-2316 de 2012 adopta los módulos de consumo. La CAR por medio del Acuerdo 004 de 2016 adoptan los módulos de consumo del recurso hídrico en su jurisdicción. Corporinoquia mediante Acuerdo Número 1100-02-2-10-003 del 13 de agosto de 2010 adopta los módulos de consumo en su jurisdicción. el AMVA adopta en el año 2010 la Guía metodológica para determinar módulos de consumo de agua y factores de vertimiento en su jurisdicción.

Tabla 46. Módulos de consumo para diferentes Clases industriales en Colombia

Código CIU 4AC	Descripción de La Clase industrial	Módulo de consumo	Unidades	Autoridad ambiental que lo establece	Nombre de la actividad establecido por La autoridad ambiental
1011	Procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos	5,2	m ³ /ton	Corantioquia	Producción de carnes frías y embutidos
		5000,0	L/ton de animal vivo	CAR	Sacrificio de ganado, preparación y conservación de carne
1040	Elaboración de productos Lácteos	2,0	m ³ /ton	CAR	Leche pasteurizada
		20,0	m ³ /ton	CAR	Mantequilla
		15,0	m ³ /ton	CAR	Queso
1051	Elaboración de productos de molinería	3,7	m ³ /ton	Corantioquia	Harina de trigo y maíz
1102	Elaboración de bebidas fermentadas no destiladas	10,0	m ³ /m ³	CAR	Vino
1103	Producción de malta, elaboración de cervezas y otras bebidas malteadas	6,0	m ³ /m ³	CAR	Cerveza
1104	Elaboración de bebidas no alcohólicas, producción de aguas minerales y de otras	5,0	m ³ /m ³	CAR	Bebidas no alcohólicas
1312	Tejeduría de productos textiles	315,0	m ³ /ton	Corantioquia	Fabricación de telas
1511	Curtido y recurtido de cueros; recurtido y teñido de pieles	34,1	L/kg	AMVA	Curtiembres
		41,0	m ³ /ton	Corantioquia	
1512	Curtido y recurtido de cueros; recurtido y teñido de pieles	28,6	L/kg	AMVA	Teñido de telas con colorantes directos
		35,8	L/kg	Cornare	
1701	Fabricación de pulpas (pastas) celulósicas; papel y cartón	19,7	L/kg	AMVA	Elaboración de cartón - Convencional.
		21,9	L/kg	Cornare	
1702	Fabricación de papel y cartón ondulado (corrugado); fabricación de envases, empaques y de embalajes de papel y cartón.	19,9	L/kg	AMVA	Elaboración de cartón - Mezcla de agua con papel y/o cartón
		26,6	L/kg	Cornare	
2011	Fabricación de sustancias y productos químicos básicos	2,5	m ³ /ton	Corantioquia	Fabricación de productos químicos
2219	Fabricación de formas básicas de caucho y otros productos de caucho n.c.p.	0,6	m ³ /ton	Corantioquia	Artículos de caucho
2592	Tratamiento y revestimiento de metales; mecanizado	6,4	m ³ /ton	Corantioquia	Galvanotecnia

Fuente: Elaboración propia a partir de AMVA & UPB (2010); Casas F (2012); Resolución Cornare número 112-2316 de 2012.

En la Tabla 47 se presentan algunos referentes de eficiencia del agua en diferentes países para diversos productos de la industria manufacturera, de empresas que han implementado medidas como recirculación, tecnologías de producción más limpia, control de fugas, entre otras.

Tabla 47. Referentes de eficiencia del agua en diferentes países

Producto	País	m ³ agua/producción	Referencia
Bebidas	Turquía	1,2 m ³ /m ³	(Alkaya & Demirer, 2015)
	Brasil	1,41 m ³ /m ³	(FEMSA, 2016)
	Colombia (Postobón)	3,17 m ³ /m ³	(Postobón, 2015)
Cerveza	Brasil	2,75 m ³ /m ³	(AMBEV, 2012)
	Australia	2,2 m ³ /m ³	(Hertle, Driel, Kinder, & Leintster, n.d.)
	Colombia (Bavaria)	3,02 m ³ /m ³	(Bavaria, 2015)
Crema y lociones	Brasil	0,34 m ³ /1000 unidades producidas	(AVON, 2016)
Neumáticos	Brasil	1,5 m ³ /tonelada	(Pirelli, 2012)
Vehículos	Colombia (Renault-Sofasa)	2,2 m ³ /unidad producida	(Renault-Sofasa, 2015)

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar, que por ejemplo para el caso de la producción de cerveza, la CAR tiene establecido un módulo de consumo de 6,0 m³/m³, mientras que en empresas de países como Brasil y Australia se reportan consumos de 2,75 m³/m³ y 2,2 m³/m³ respectivamente, en Colombia, la empresa Bavaria S.A reporta una productividad de 3,02 metros cúbicos de agua por metro cúbico de cerveza. Así mismo sucede con el caso de bebidas no alcohólicas para las cuales la CAR establece módulos de consumo de 5 m³/m³ mientras que en empresas de Turquía y Brasil el consumo promedio es de 1,2 y 1,41 m³/m³, en Colombia la empresa Postobón S.A reporta una productividad de 3,17 metros cúbicos de agua por metro cúbico de bebida producida. Estas dos empresas colombianas, han implementado medidas como sistemas de recirculación dentro de sus procesos y plantas de tratamiento de aguas residuales, con las cuales han mejorado la eficiencia y productividad del agua.

La productividad del agua de los referentes internacionales, son una base para establecer medidas para aumentar las eficiencias en los procesos productivos y para establecer módulos de consumo más estrictos que desincentiven el uso excesivo de agua y promuevan la adopción de buenas prácticas.

La productividad del agua puede incrementarse mediante diversas medidas, las cuales pueden ser desarrolladas individualmente por las empresas, mientras que otras necesitan la colaboración del sector público y los gobiernos. Generalmente, una combinación de medidas puede resultar en una reacción exitosa al desafío del estrés hídrico. La aplicación de las nuevas tecnologías debe reunir incentivos efectivos, regulaciones justas y correctas, herramientas de gestión eficientes y liderazgo comprometido, tanto en los negocios como en las comunidades. La adecuación de la calidad a la demanda, el reciclaje o reutilización en el sitio y la recuperación del agua se consideran una respuesta eficaz al reto de la productividad del agua (UNIDO, 2007).

Dentro de los principales factores que inciden en la productividad del agua se encuentra la adopción de procesos de producción más limpia, incluyendo la adquisición de nuevas tecnologías, la sustitución de

materias primas, como también la investigación en el tema, la difusión y acceso a información relacionada con este tipo de prácticas¹⁰²

De los casos analizados a nivel internacional, se destaca el caso del Premio de conservación y reúso del agua (*Prêmio Conservação e Reúso da Água*), el cual se lleva a cabo cada año por la Federación de las Industrias del Estado de São Paulo (FIESP) en Brasil y busca promover el uso eficiente del agua en las diferentes industrias del Estado.

Cuadro 12. Premio de conservación y reúso del agua (Brasil)

Premio de conservación y reúso del agua (Prêmio Conservação e Reúso da Água)
(FIESP, 2017)

La Federación de las Industrias del Estado de São Paulo (FIESP) hace más de diez años fomenta la concientización del sector industrial sobre la importancia y la necesidad de la implantación de buenas prácticas de conservación y reutilización de agua en sus procesos.

Reconociendo los beneficios ambientales, sociales y económicos de estas prácticas, FIESP promueve anualmente el Premio de Conservación y Reutilización de Agua, como forma de conocer, difundir y homenajear, anualmente, empresas que utilizan buenas prácticas en la promoción del uso eficiente del agua, con medidas efectivas en la reducción del consumo y del desperdicio de agua, generando beneficios ambientales, sociales, y aumentando la competitividad del sector, así como dar amplia publicidad a las acciones realizadas por la industria paulista en la construcción del desarrollo sostenible.

En este concurso puede participar cualquier tipo de empresa industrial (pequeña, mediana o grande) que haya implantado medidas de conservación y reutilización de agua y que autorice su amplia divulgación.

De este modo, se ha promovido la adopción de prácticas para la conservación del agua en el Estado de Sao Paulo para los diferentes tipos de industria.

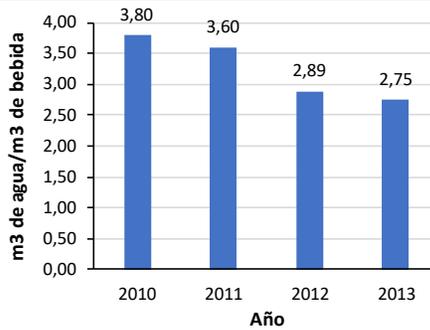
A nivel nacional e internacional existen diversos casos en los cuales se evidencia el efecto de la adopción de procesos de producción más limpia sobre la productividad del agua en las diferentes industrias (Ver anexo 5). Dentro del sector se pueden referenciar variedad de casos en los cuales se han implementado sistemas de recirculación y otro tipo de medidas con las cuales se ha logrado un aumento de la productividad del agua. En el Cuadro 13 se presenta el caso de la empresa Ambev, dedicada a la producción de cervezas, en la cual se logró una reducción en el consumo de agua.

Cuadro 13. Caso exitoso industria de bebidas.

Caso Ambev
(AMBEV, 2012)

Ambev, es una empresa privada de Brasil que integra la mayor plataforma de producción y comercialización de cervezas y otras bebidas en Latinoamérica.

¹⁰² Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en Taller comité consultivo 1 “diagnóstico y priorización”



La empresa se propuso reducir la captación de agua del río Jaguarí y, consecuentemente, disminuir el consumo medio de agua por volumen de bebida producida, reducir su impacto al medio ambiente, aumentar el reciclaje de agua en el proceso productivo, y, como consecuencia, minimizar los vertimientos generados. Para esto, **la compañía implementó un sistema de recirculación**, el cual permite el reciclaje de agua en diferentes procesos productivos, mejorando de este modo la productividad del recurso hídrico.

El agua recirculada sólo se aplica a lo que se llama uso secundario, como limpieza y utilidades de la línea de producción y no se incorpora al producto.

Se construyeron cisternas para captar el agua caliente generada durante el proceso de pasteurización de la cerveza. El agua sigue de estas cisternas a 14 torres de enfriamiento y 10 condensadores evaporativos, que la enfrían para luego retornar al sistema. El sistema garantiza un volumen de hasta 1.100 metros cúbicos de agua reutilizada todos los días.

Estas medidas han permitido que entre el año 2010 y 2013 la empresa redujera la cantidad de agua utilizada para producir un metro cubico de bebida pasando de 3,8 a 2,7 metros cúbicos de agua utilizados, mejorando de este modo la productividad del agua en un 28%.

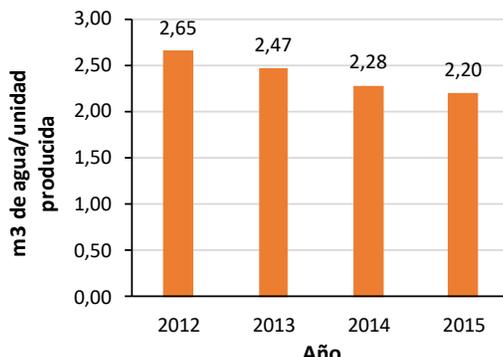
Para 2010 la inversión en sistemas de reaprovechamiento de agua fue de aproximadamente 1 millón de reales (600.000 USD¹⁰³).

Para el caso de Colombia, también existen casos en los cuales se han implementado procesos de producción más limpia para mejorar la eficiencia y productividad del agua. En el Cuadro 14 se presentan dos casos correspondientes a la industria de alimentos y un caso correspondiente a la fabricación de vehículos automotores

Cuadro 14. Casos exitosos industria de alimentos.

Vikingos (CNPML, 2002)	Grupo Nutresa (Nutresa, 2014)
Vikingos es una empresa de alimentos del sector manufacturero que procesa recursos hidrobiológicos. La reducción en el consumo de agua para la esterilización de 100.000 latas diarias se logró porque se implementó un sistema de recirculación del agua que sale de la autoclave , la cual es almacenada y posteriormente con una bomba sumergible y una torre de enfriamiento se acondiciona la temperatura del agua para ser incorporada de nuevo al proceso.	El grupo Nutresa tiene como meta entre los años 2014 a 2020 una reducción en el 30% de agua utilizada en sus procesos. El cumplimiento de la meta, permitirá además reducir la proporción entre el costo del agua sobre el costo de las ventas y llevarlo de 0,16% a 0,11% neutralizando el incremento potencial de las tarifas. Dentro de las medidas que ya se han implementado para mejorar la gestión del agua se pueden mencionar:

¹⁰³ Valor aproximado en dólares al año 2010

<p>Con estas medidas se logró una reducción en el 80% del consumo de agua utilizada en la esterilización de latas de atún.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proyecto de reúso de aguas en el Negocio de Pastas en su Planta de Mosquera, con lo cual se redujo el consumo de agua potable. • Recuperación de condensados del uso del vapor y de los destilados del proceso de evaporación. • Recuperación y reutilización de aguas de autoclaves. • Plantas de tratamiento de aguas residuales • Instalación de unidades sanitarias modernas y dispositivos ahorradores que permiten reducir el consumo de agua en 50%. 										
<p style="text-align: center;">Renault – Sofasa (Renault-Sofasa, 2015)</p> <p>Sofasa desde el año 2012 ha diseñado e implementado diferentes iniciativas de gran alcance que ha dado lugar a una reducción del 17% en el volumen captado de agua desde el año 2012 al 2015 pasando de 2,65 a 2,20 m³/unidad producida. La empresa ha llevado a cabo algunos proyectos que han logrado la reducción en el consumo de agua, estos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uso de aguas lluvias optimizando el área de techos para la captación de esta agua. Aumentando su captación de agua lluvia de 782m³ en 2013 a 2.652 m³ en 2015 • Reutilización de agua, se ha aumentado el porcentaje de agua reciclada respecto al consumo de un 6% en el año 2013 a un 11% en 2015. • Aprovechamiento de aguas subterráneas a partir de la operación de una planta de tratamiento de aguas de pozo, lo que permite dejar de demandar aproximadamente 300m³ diarios de agua potable del acueducto municipal • Instalación de sistemas ahorradores de agua en los baños • Realización e implementación del programa integral de seguimiento y control de fugas. • Instalación de sensores de nivel para el llenado de fosas de pintura <p>Adicionalmente se realiza un tratamiento fisicoquímico a las aguas residuales por medio de una PTAR, en la cual se trata aproximadamente un 62% del agua usada en la empresa.</p> <div style="text-align: right;">  <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: 0;"> <thead> <tr> <th>Año</th> <th>m³ de agua/unidad producida</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2012</td> <td>2,65</td> </tr> <tr> <td>2013</td> <td>2,47</td> </tr> <tr> <td>2014</td> <td>2,28</td> </tr> <tr> <td>2015</td> <td>2,20</td> </tr> </tbody> </table> </div>		Año	m ³ de agua/unidad producida	2012	2,65	2013	2,47	2014	2,28	2015	2,20
Año	m ³ de agua/unidad producida										
2012	2,65										
2013	2,47										
2014	2,28										
2015	2,20										

De acuerdo con los casos analizados, se puede mencionar que, aunque la implementación de diferentes medidas para mejorar la eficiencia del agua implica costos de inversión, se observa que las empresas a través de estas medidas han obtenido ahorros en términos de agua los cuales se ven reflejados finalmente en ahorros económicos.

La **recirculación** es el principal medio para ahorrar agua en un proceso industrial. Las estrategias de recirculación garantizan disminución en costos y ahorros en agua, adicionalmente representa beneficios ambientales ya que se toma agua residual que de otro modo sería descargada y se usa en una aplicación que requiere menor calidad. La manera en que la recirculación del agua se hace, va a depender de la naturaleza del proceso de fabricación, así como del grado de tratamiento de aguas residuales que sea necesario implementar. Procesos tales como calefacción y refrigeración son las aplicaciones más comunes que se desarrollan en las industrias. También se puede utilizar como agua de lavado y para la limpieza. A nivel mundial se conocen ejemplos de varias industrias como bebidas, textiles, de papel, entre otras que han implementado sistemas de recirculación de agua dentro de sus procesos,

umentando de este modo la productividad del agua, como se observa en los casos presentados en esta sección y en los reportados en el anexo 5. A través de la recirculación, la productividad del agua del producto aumenta considerablemente, ya que se utiliza menos agua dulce para producir la misma cantidad de producto.

Para aplicaciones industriales, el ahorro de recursos hídricos primarios es importante porque son limitados. Sin embargo, a pesar de la disponibilidad de tecnología y estudios prácticos para demostrar sus ventajas, la aplicación de la recirculación es muy limitada, probablemente debido a la inversión inicial que se requiere (UNIDO, 2007; WWAP, 2006).

Las estrategias industriales de gestión del agua para llevar a cabo un uso eficiente del agua pueden estar dirigidas en una compañía hacia factores internos o externos. A nivel interno se definen medidas que se enfoquen a nivel de consumo de agua y de generación de aguas residuales a controlar, como recirculación. Por otro lado, las estrategias externas son medidas que se requieren a nivel de la industria en el contexto de las **políticas locales, regionales o nacionales de gestión del agua industrial**. Algunas de estas estrategias son: contar con un **marco normativo enfocado a reúso y recirculación del agua**¹⁰⁴; la posibilidad de agrupación de industrias en un lugar determinado (parques industriales), aprovechar eficientemente el agua dentro de la industria, para que cada proceso cuente con las mejores medidas en términos de eficiencia y la aplicación de instrumentos económicos como multas, subsidios, créditos blandos y donaciones.

Un ejemplo puede verse en Singapur, que impone una tasa de cobro del 15% sobre el consumo de agua industrial, específicamente sobre aquellas industrias que utilicen más de una cantidad específica. Adicional, las fábricas nuevas que utilizan más de 500 metros cúbicos de agua por mes deben contar con una aprobación por parte del gobierno (WWAP, 2006).

Los **incentivos económicos** también representan un factor que tiene influencia positiva en el uso eficiente y el aumento de la productividad del agua dentro del sector industrial. Dichos incentivos podrían incluir subsidios para las industrias que implementan tecnologías ambientales innovadoras y apoyo financiero y de asesoría para las industrias que financian nuevas investigaciones (WWAP, 2006).

Un ejemplo de programas que han fomentado el uso eficiente y el aumento de la productividad del agua dentro del sector industrial ha sido en la ciudad de Bogotá, por medio de la Secretaría Distrital de Ambiente, que desde el año 2011 ha **incentivado la inversión ambiental** mediante la Resolución 7189 de 2010 clasificando las empresas en bajo y medio impacto ambiental, para efectos del pago del impuesto predial y la Resolución 5999 de 2010 como el **programa de Excelencia Ambiental Distrital – PREAD**, que además de los beneficios tributarios, cuenta con otros como el reconocimiento público de su destacada acción”.

A nivel institucional, el desarrollo y adopción de innovaciones en la productividad del agua requiere de sistemas de innovación que involucren una variedad de actores, desde universidades públicas y privadas e instituciones de investigación hasta productores, agencias de manejo de agua y el sector privado.

¹⁰⁴ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en Taller comité consultivo 1 “diagnóstico y priorización”

Además, se deben **desarrollar investigaciones**¹⁰⁵ que se centren fuertemente en lograr una mayor producción con menos agua a múltiples escalas y en múltiples contextos.

Dentro de los casos analizados, cabe resaltar el esfuerzo que realizan diversas **instituciones de investigación** y gremios que trabajan en el uso eficiente del agua, ya que las investigaciones generadas sirven como base para la toma de decisiones en las empresas y también para la toma de decisiones a nivel político. Las medidas institucionales, son de gran relevancia en el tema del mejoramiento de la productividad del agua. Por ejemplo, en Australia existe el Centro Australiano de Reciclaje de Agua, el cual es una organización nacional de investigación establecida para mejorar la eficiencia, expansión y aceptación del reciclaje de agua en Australia a través de la industria, el gobierno y las asociaciones de investigación. Este Centro ha desarrollado soluciones prácticas para asegurar el suministro futuro de agua en Australia (Australian Government, 2013).

Entre las **medidas normativas** que han adoptado algunos países para mejorar la productividad del agua y aumentar el reúso de la misma, se pueden mencionar: el caso de Brasil, la resolución 54 del año 2005, en la cual se establecen las modalidades, directrices y criterios generales que regulan y estimulan la práctica de reúso directo no potable de agua en todo el territorio brasilero. España también ha incluido en su normativa el tema de reúso del agua en el decreto 1620 del año 2007, regulación española para el reúso de agua.

La Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA), también desarrolló en el año 2012 la guía para el reúso del agua, la cual Incluye una discusión actualizada sobre las variaciones regionales de la reutilización del agua en los Estados Unidos, los avances en las tecnologías de tratamiento de aguas residuales relevantes para la reutilización, las mejores prácticas para involucrar a las comunidades en proyectos de planificación y las prácticas internacionales de reutilización de agua en el mundo (United States Environmental Protection Agency EPA, 2012).

En Colombia, mediante la resolución 1207 del 2014, se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas y se establecen los usos específicos en los cuales puede ser utilizada agua residual tratada dentro de los sectores agrícola e industrial.

Es importante destacar que el desarrollo de innovaciones en la productividad del agua no garantiza automáticamente su adopción, que a menudo se ve limitada por la falta de cadenas de suministro adecuadas, asistencia técnica, mercados e incentivos. Por ejemplo, **si los precios del agua son bajos, el incentivo para invertir en medidas para la reducción del consumo de agua también será bajo** (Lenton, 2013).

7.1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS PROBLEMAS DE EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

En la Tabla 48 se presentan a manera de resumen, los factores identificados que influyen en los problemas de productividad y eficiencia del uso del agua.

Tabla 48. Factores identificados del sector de la industria manufacturera y que influyen en los problemas de productividad y eficiencia del uso del agua

¹⁰⁵ Conclusión obtenida mediante consulta a expertos en Taller comité consultivo 1 “diagnóstico y priorización”

Criterio	Factores	Descripción
Tecnológico	Sistemas de tratamiento de aguas residuales y calidad de agua requerida	Los sistemas de tratamiento influyen en el acondicionamiento de la calidad del agua requerida para los procesos. Por otro lado, mientras no se cumpla con los requerimientos de calidad para la actividad productiva, mayores serán los costos de tratamiento y su uso será más restrictivo.
	Disponibilidad de Información	Para mejorar la eficiencia y la productividad del agua en la industria, es importante que exista información sobre el consumo de agua en cada uno de los procesos, así como de los requerimientos de calidad. También es de gran importancia que las empresas reporten este tipo de información y también que den a conocer experiencias exitosas para mejorar el uso del agua.
	Investigación y desarrollo	La inversión en investigación y desarrollo es uno de los principales factores para promover el crecimiento económico a largo plazo y es importante en el desempeño de las empresas.
	Procesos de producción sostenible	Existe un bajo nivel de innovación, investigación y desarrollo en muchas empresas en temas relacionados con el uso eficiente del agua y poca adopción de técnicas de producción más limpia como: mejoras en el proceso, buenas prácticas operativas, mantenimiento de equipos, reutilización y reciclaje del agua, cambios en la materia prima y cambios de tecnología, que favorezcan una mayor productividad del agua.
Económico	Precio del Agua	Cuando el precio del agua es muy bajo, las empresas no tienen incentivos para implementar medidas de uso eficiente del agua. Por el contrario, si el precio del agua es alto, las empresas se verán con la necesidad de implementar estrategias que disminuyan sus costos de producción.
	Inversión	La inversión por parte de las empresas en la implementación de sistemas de uso eficiente y ahorro de agua es vital para mejorar la productividad del agua. En muchas ocasiones los costos de implementación pueden ser altos, pero éstos deben ser vistos como una inversión y no como un gasto.
	Costos de producción	Los costos de producción dependen de diversos factores como el tipo de tecnologías utilizadas, las materias primas usadas, el personal, entre otros, los cuales deben ser seleccionados de manera adecuada para que representen un menor costo manteniendo la eficiencia y productividad de los procesos.
Político	Instrumentos económicos	Los instrumentos económicos se basan en la utilización de incentivos económicos o de mercado para generar los comportamientos deseados por parte de determinado actor (CEPAL, 2015). Dentro del sector industrial se podrían diseñar instrumentos que incentiven el uso eficiente del agua en la producción.
	Normatividad	Normatividad relacionada con los temas de reúso, incentivos económicos para las empresas y uso eficiente del agua, son de gran influencia en la implementación de procesos más eficientes en el tema del recurso hídrico.
	Articulación en el ordenamiento	Existe un gran número de instrumentos de ordenamiento territorial a diferentes niveles, sin embargo, no hay una adecuada articulación entre estos y entre los diferentes sectores productivos.

Criterio	Factores	Descripción
	Institucionalidad	Las entidades públicas de orden nacional, regional y local, representan un importante factor en el uso del agua dentro del sector industrial. Es necesario fortalecer e integrar instituciones que apoyen el desarrollo y la adopción de procesos que fomenten la productividad y eficiencia del agua en los procesos industriales.
Ambiental	Disponibilidad hídrica	Por disponibilidad hídrica se entiende la calidad del agua y la oferta hídrica. En lugares donde la disponibilidad hídrica es baja, la productividad del agua también será baja, debido a que los costos por consumo del recurso serán mayores dada la dificultad de acceso, sin embargo, estas condiciones hacen que en estas zonas exista un potencial de reúso y recirculación para la implementación de tecnologías de uso eficiente del agua para mejorar la productividad del agua.
Social	Aspectos socio-culturales	Es importante el compromiso que cada empresa tenga respecto al tema del uso del agua, y la inclusión de temas ambientales dentro de sus políticas empresariales. Adicionalmente, temas como los patrones de consumo inciden en la oferta de productos, por ejemplo, productos amigables con el medio ambiente.
	Capacitación	La capacitación dentro de las empresas es de gran importancia para la adecuada operación y mantenimiento de tecnologías ahorro y uso eficiente de agua, así como en la innovación dentro de la industria.

Dentro de las principales problemáticas asociadas al uso eficiente de agua en la industria se pueden mencionar las siguientes: la contaminación del agua aguas arriba de la captación de las industrias aumenta los costos de tratamiento para utilizar el agua en los diferentes procesos, no existe una cuantificación precisa del consumo de agua en el sector debido a que las industrias no están obligadas a reportar los consumos de agua en cada uno de sus procesos productivos y en muchos casos esta información no se conoce incluso dentro de la misma empresa, por otro lado, medidas para el uso eficiente del agua son rechazadas por parte de las empresas en muchos casos por falta de conciencia ambiental y también por el hecho de ser consideradas medidas con altos costos de implementación que no pueden ser recuperados fácilmente a futuro (Casas F, 2012).

7.2 VERTIMIENTOS EN EL SECTOR INDUSTRIAL MANUFACTURERO

La industria manufacturera tiene procesos muy variados de acuerdo con el tipo de producto fabricado, al tipo de insumos y materias primas utilizadas, procesos, instalaciones, etc. Por lo cual los vertimientos generados serán muy variados para las diferentes industrias.

En general las industrias se ocupan de la gestión de sus aguas residuales antes de ser vertidas. Dichos vertimientos pueden disminuirse mediante la reducción de la contaminación en la fuente, la aplicación de tratamientos adecuados o la reutilización de las aguas residuales dentro de las diferentes operaciones de la industria (UNIDO, 2007).

Las aguas residuales industriales son las que proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua, incluyendo aguas de proceso, soluciones ya gastadas, efluentes de lavados, del uso como medio de transporte, los líquidos generados en algunos procesos, aguas de las extracciones de los tanques de torres de enfriamiento y aguas de drenaje sanitario y pluvial (AIDIS, 2016).

Las aguas residuales industriales se caracterizan por tener caudal y composición variables durante el día y los meses del año, fluctuación de las concentraciones y diversidad de contaminantes, incluso dentro de la misma industria, alta concentración de contaminantes, presencia de compuestos tóxicos, persistentes y bioacumulables, color y altas temperaturas y pueden estar influenciados por factores como los procesos de fabricación, las materias primas e insumos utilizados, la capacidad de producción, el modo de operación, tamaño de la planta; ciclo de producción y actividades temporales; así como el uso de sistemas de recirculación y reúso de agua (AIDIS, 2016).

Otro factor importante es el mantenimiento de los equipos y las instalaciones, ya que un adecuado plan de mantenimiento de todos los equipos involucrados en el proceso asegura la reducción de tiempos muertos por paros inesperados, la fuga de contaminantes como combustibles y lubricantes y el excesivo empleo de agentes de limpieza y desinfección. Por otro lado, los sistemas de recirculación representan un factor importante dentro de los vertimientos generados por cada tipo de industria, ya que numerosos procesos internos dentro del amplio engranaje productivo generan residuos intermedios que pueden tratarse con bajos niveles de inversión y pueden ser utilizados dentro del mismo proceso productivo, reduciendo así el consumo de agua y los vertimientos generados (Restrepo, 2006).

En Colombia, los vertimientos de aguas residuales del sector industrial manufacturero están regulados por la Resolución 631 de 2014, en la cual se especifican los valores límites máximos permisibles para diferentes parámetros de calidad de agua de los vertimientos puntuales a sistemas de alcantarillado público o cuerpo de agua superficial en los diversos sectores manufactureros¹⁰⁶. A continuación, se hace un análisis de los vertimientos de las industrias priorizadas en este estudio.

7.2.1 SECTOR ALIMENTOS

La industria alimentaria es uno de los sectores productivos con mayor impacto sobre el medio ambiente, debido a su alto consumo de agua y producción de residuos. Por ejemplo, en el procesamiento de frutas y vegetales, las aguas residuales generadas tienen alto contenido de sólidos suspendidos, azúcares, harinas, agentes de blanqueado, sales e incluso residuos de pesticidas.

En la producción de lácteos, las aguas residuales generadas se caracterizan por altos contenidos de grasas, proteínas, sales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos, además de una alta concentración de DBO aportada principalmente por la lactosa y el suero resultante en algunos procesos (Restrepo, 2006).

Por otro lado, el procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos, se caracteriza por generar vertimientos con alto contenido de carga contaminante, principalmente como DBO, grasas y sólidos suspendidos. Esta industria puede producir vertimientos con hasta 8.000 mg/L de DBO; también puede encontrarse presencia de pesticidas e incluso niveles considerables de cloro cuando hay operaciones que involucran curado y salmuera. Los residuos además son ricos en nitrógeno y materia orgánica.

¹⁰⁶ La Resolución 631 de 2014 aplica no solo a los vertimientos puntuales generados por el sector industrial manufacturero sino también a todos los demás sectores que generen vertimientos de ARD y ARnD a cuerpos de agua superficial o a alcantarillado público.

Adicionalmente las aguas residuales provenientes de las industria de alimentos pueden contener detergentes y desinfectantes provenientes de los procesos de limpieza y lavado de equipos (GIA, UPB, & AMVA, 2005; Restrepo, 2006).

7.2.2 SECTOR ELABORACIÓN Y REFINACIÓN DE AZÚCAR

Las aguas residuales de la industria azucarera surgen por el conjunto de los residuos líquidos generados en el procesamiento de la materia prima, restos de las sustancias incorporadas al proceso de fabricación, más las aguas de desechos destinadas a la limpieza periódica de los equipos de fabricación. Este tipo de industria emplea grandes volúmenes de agua en el procesamiento de la caña de azúcar. Se considera que los volúmenes y sus características varían de acuerdo a la duración y tipo de operación, la capacidad del ingenio, la técnica empleada para limpieza, entre otros factores (MAVDT & SAC, 2002).

En la Figura 43 se presenta un esquema en el cual se identifican los procesos dentro de la industria azucarera en los cuales se producen aguas residuales.

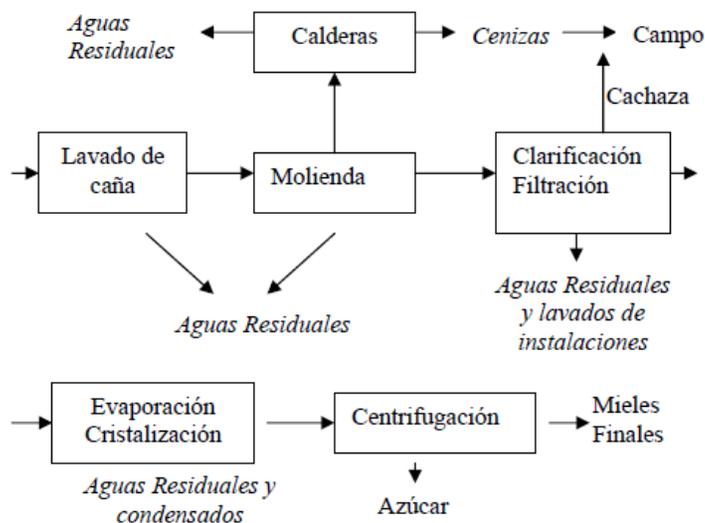


Figura 43. Generación de agua residual en la industria azucarera
Fuente: (MAVDT & SAC, 2002)

Las aguas residuales generadas en el sector azucarero, se caracterizan por presentar altos contenidos de DBO (entre 1700 y 7000 mg/L) y DQO (entre 2300 y 10000 mg/L), igualmente pueden contener agentes patógenos y residuos de pesticidas empleados en los cultivos (Restrepo, 2006).

7.2.3 SECTOR ACEITES Y GRASAS DE ORIGEN VEGETAL Y ANIMAL

Este tipo de industria genera especialmente contaminación del agua, por la alta concentración de materia orgánica, sólidos suspendidos, grasas y aceites.

Las plantas de beneficio de aceite de palma producen grandes cantidades de aguas residuales, sobre todo en la esterilización de la fruta y en la clarificación del aceite. En promedio una planta típica produce aproximadamente 0,8 m³ de efluente, llamado pome¹⁰⁷ por cada tonelada procesada de racimos de fruta

¹⁰⁷ El pome es un líquido color marrón-amarillo que contiene en promedio 55.000,0 mg/l de DQO, 20.000, mg/l de DBO, 20.000 mg/l de sólidos suspendidos, altas temperaturas que alcanzan los 80°C, pH ácido entre 4 y 5 y altos contenidos de grasas y aceites. Debido a estas características,

fresca. Por tanto, una planta extractora mediana con 150.000 toneladas por año, produce aproximadamente 120.000 m³ de pome al año o 450 m³ por día.

7.2.4 SECTOR PAPEL

La industria papelera utiliza grandes cantidades de agua para la generación de pulpa y papel¹⁰⁸. Emplea cloro elemental o dióxido de cloro para el blanqueo de la pulpa y, en algunos procesos, soda cáustica, para la cocción de la materia prima. Una fracción de los compuestos mencionados anteriormente, junto con otros compuestos característicos de la materia prima son vertidos como aguas residuales. Estos vertimientos se caracterizan por presentar altas concentraciones de DQO, DBO y de SST. La materia orgánica presente en este tipo de agua residual, generalmente está compuesta por fibras de celulosa, carbohidratos, productos transformados de azúcares, polisacáridos, ácidos orgánicos, resinas ácidas y ligninas y una variedad de derivados clorados que al reaccionar pueden generar compuestos organoclorados, los cuales son persistentes, bioacumulables y tóxicos (J. Rodríguez, Mañunga, & Cárdenas, 2012).

7.2.5 PRODUCCIÓN DE MALTA, ELABORACIÓN DE CERVEZAS Y OTRAS BEBIDAS MALTEADAS

El agua en la producción de cerveza, además de formar parte del producto final, se emplea en diversas etapas de su fabricación, como limpieza de equipos e instalaciones, circuitos de refrigeración y calderas, envasado y en instalaciones sanitarias.

El volumen de agua residual que se genera en las instalaciones cerveceras corresponde al total consumido menos el incorporado al producto final, el que se evapora en las operaciones de producción y servicios auxiliares y la que queda absorbida en la matriz sólida de los residuos generados. Las aguas residuales de cervecería provienen, tanto de la fabricación de malta y cerveza, como de los lavados y limpieza de equipos, instalaciones y envases. Estas aguas residuales se caracterizan por una carga orgánica elevada, pH variable y concentraciones apreciables de sólidos en suspensión. El contenido en nitrógeno total suele ser alto, como consecuencia de los aportes de levadura a las aguas residuales (Escuela Organización Industrial- Sevilla, 2008).

7.2.6 BENEFICIO DE CAFÉ

Los contenidos de contaminantes orgánicos y minerales presentes en las aguas residuales de este tipo de industria están relacionados con el tipo de beneficio empleado (fermentación natural y desmucilaginado) y con la cantidad y calidad del agua usada en el proceso. En Colombia, Cenicafé ha realizado estudios de caracterización físico-química y microbiológica de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio (Tabla 49).

Tabla 49. Características promedio de aguas residuales provenientes del lavado de café

Parámetro	pH	DQO total (ppm)	DQO filtrada (ppm)	DBO ₅ (ppm)	N-NTK (ppm)	N-NH ₃ (ppm)
Promedio	3,71	10.070,00	7.144,50	3.875,00	218,25	9,51
Parámetro	ST	SST	P-PO ₄	S-SO ₄	N-NO ₃	Acidez

estas aguas residuales deben ser sometidas a un tratamiento adecuado antes de ser vertidas o utilizadas en riego u otras actividades (Althausen, 2016).

¹⁰⁸ Según los módulos de consumo de agua reportados como referencia en la Tabla 11 para la Fabricación de papel, cartón y productos de papel y cartón, el consumo de agua varía entre 19.7 L/kg y 26.6 L/kg

	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
Promedio	2.818	1.553	0,02	29,5	0,73	823

Fuente: (Rodríguez, 1999 citado por Cárdenas & Ortiz, 2014)

El agua residual de café es biodegradable en casi su totalidad en procesos de digestión anaerobia. Aproximadamente un 80% de la DQO es convertido rápidamente en metano. En resumen, las aguas residuales que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del fruto del café, son biodegradables, pero poseen características físico-químicas, particularmente agresivas con el medio ambiente, como pH bajos y altas concentraciones de materia orgánica (Cárdenas & Ortiz, 2014).

En el proceso de beneficio húmedo de café, el 72% de la carga contaminante se produce en el proceso de despulpar y transportar la pulpa y el 28% restante durante la etapa de lavado, sin embargo los vertimientos generados dependen del tipo de tecnologías utilizadas en el proceso (Ramírez, Oliveros, & Sanz, 2015).

7.2.7 SECTOR TEXTIL

Este sector se caracteriza por un alto consumo de agua, en especial durante las etapas de teñido y acabado. Los vertimientos generados, tienden a ser muy variables en términos de volumen y composición. Adicionalmente, se caracterizan por el aporte de carga contaminante representada por parámetros como la DQO, DBO, concentración de sales (conductividad), pH y color (GIA et al., 2005). Ospina R., Montoya A., & García P., (2007) reportaron vertimientos provenientes de diferentes procesos de tintorerías con un caudal promedio de 4,2 L/s, temperaturas del agua entre los 20 y 50°C, de color azul oscuro y con presencia de olores fuertes, una DBO₅ entre 100 y 600 mg/L, DQO 470-1400 y SST 200-1800 mg/L.

Generalmente los vertimientos se realizan en forma discontinua. Los procesos que aportan carga contaminante son (FUNDES, 2001):

- Descrudes, con vertimientos de detergentes, emulsionantes, secuestrantes, antiespumantes, solventes, suavizantes y productos engomantes.
- Teñidos, con vertimientos de colorantes, igualadores, dispersantes, antiespumantes, estabilizadores de pH, secuestrante de dureza.
- Blanqueo, con vertimientos de soda, solventes, blanqueadores ópticos, emulsionantes, peróxidos y ácidos.
- Lavados, con vertimientos de detergentes y de colorantes hidrolizados.
- Estampados, con vertimiento de colorantes y pigmentos remanentes y productos auxiliares como ácidos, estabilizadores, álcalis, humectantes, resinas y ligantes.
- Acabados, con aporte de suavizantes, resinas, catalizadores, impermeabilizantes, humectantes, antideslizantes.

7.2.8 SECTOR CURTIEMBRES

El curtido de cuero supone la generación de grandes cantidades de materia orgánica, y efluentes líquidos que arrastran compuestos que pueden alcanzar niveles tóxicos de concentración (caso del sulfuro y cromo trivalente, para el curtido mineral y un poco menos estudiados los taninos para el curtido vegetal) (GIA et al., 2005).

La naturaleza de las pieles aporta una alta carga orgánica a los vertimientos; adicionalmente, algunos subproductos y residuos se vierten con las aguas residuales a la red de alcantarillado o a los cuerpos de agua. Las grandes cantidades de proteínas y los productos de su degradación forman uno de los grupos constituyentes más importantes de la carga contaminante en los vertimientos, teniendo efectos negativos sobre el medio ambiente.

Los altos contenidos de DBO, se deben a la presencia de materia orgánica en los vertimientos y se producen principalmente en los procesos de pelambre y curtición vegetal. También se presentan altos contenidos de DQO, grasas y aceites, sólidos suspendidos, sulfuros, cromo, fenoles, entre otros (Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente - DAMA, 2004).

7.2.9 SECTOR GALVANOPLASTIA

Esta es una industria de alto impacto ambiental, debido a que origina significativas cantidades de efluentes líquidos, en muchos casos **con niveles considerables de toxicidad y peligrosidad**.

Los objetos y piezas que son sometidos al proceso de recubrimiento galvánico, arrastran líquidos con elevadas concentraciones de metales. Este arrastre representa el volumen de electrolito que se pierde en el proceso productivo, el cual se incorpora a los enjuagues durante la inmersión de las piezas y contamina las aguas que posteriormente son vertidas al medio (GIA et al., 2005).

Los vertimientos líquidos pueden presentar características ácidas o básicas según su procedencia. En particular, los residuos líquidos provenientes de procesos de cromado, se caracterizan por su contenido de ácido crómico libre y bicromatos en solución neutra o débilmente ácida. También pueden contener altas cantidades de sólidos en suspensión, sustancias tóxicas disueltas y grasa proveniente de los baños de desengrase; si se utilizan baños ácidos de cobre, níquel, plata entre otros. Las aguas ácidas generadas contienen los metales correspondientes en concentraciones de trazas, más los diversos compuestos asociados a productos anexos agregados al baño. Los principales compuestos disueltos que deben ser controlados son: cromo hexavalente, estaño bivalente, iones de paladio, cobre, níquel, plata, sodio y potasio y algunos orgánicos reductores como formaldehído y azúcares (FUNDES, 2010).

En general los residuos líquidos descargados por este tipo de industria provienen de (FUNDES, 2010):

- Aguas de lavado, enjuague y enfriamiento
- Goteos y derrames de trasiego
- Líquidos del lavado de gases
- Baños de proceso agotados
- Mantenimiento de baños de proceso
- Baños de remoción y acondicionamiento: contaminados, agotados
- Soluciones de sistemas de lavado/extracción de gases
- Pérdidas accidentales

En la Tabla 50 se presenta un compendio de las principales características fisicoquímicas de las aguas residuales producidas en los sectores industriales y que fueron mencionados anteriormente.

Tabla 50. Principales características fisicoquímicas de los vertimientos de aguas residuales del sector industrial

Sector	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	pH (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)	pesticidas (mg/L)	Cloro (mg/L)	Nitrógeno total (mg/L)	Patógenos	Detergentes (mg/L)	Metales pesados	Color
Sector alimentos	8.000				X	X	X	X		X		
Elaboración y refinación de azúcar	1.700 – 7.000	2.300 – 10.000				X			X			
Sector aceites y grasas (beneficio de aceite de palma)	20.000	55.000	20.000	4 - 5	X							
Sector papel	X	X	X									
Producción de malta, cervezas y otras bebidas malteadas	X	X	X	X				X				
Lavado de café	3.875	10.070	1.553	3,71				218,25				
Sector textil	100 - 600	470- 1.400	200- 1.800	X						X		X
Sector curtimbres	912 – 6.083	1.270 – 8.200	292 – 1.327	6,9 – 11,5	35– 433						X	
Sector galvanoplastia			X	X	X						X	

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los valores con X corresponden a características fisicoquímicas del sector y que se encuentran en los vertimientos líquidos. Sin embargo, no fue posible establecer rangos típicos para este parámetro.

7.3 REÚSO

El desarrollo industrial ha traído grandes beneficios en cuanto a crecimiento económico, transformación tecnológica y social, mejoras en la calidad de vida de la población, pero junto con esto se han provocado fuertes afectaciones en los diferentes componentes del medio ambiente, como lo es la sobreexplotación de los recursos hídricos y su contaminación (Esandi, Sartor, & Schmidt, 2013).

Frente a estos problemas han surgido diversas estrategias, dentro de las cuales se destaca el reúso de agua, es decir, el uso de aguas residuales tratadas provenientes de otras unidades económicas. Dentro de la industria, el reúso del agua puede estar definido por factores como la disponibilidad de agua, cantidad y calidad del agua requerida, características del agua residual, requerimientos normativos para la calidad de las descargas a cuerpos receptores y la factibilidad técnico-económica del proyecto de reúso (National Academy of Sciences, 2012).

Los requerimientos de calidad de agua para los usos industriales son un factor de gran relevancia, ya que son diferentes dependiendo del tipo de proceso o actividad. El agua de una calidad dada puede ser satisfactoria para unos propósitos, mientras que puede ser totalmente inadecuada para otros fines. De este modo, el reúso de agua es más factible para actividades industriales que requieren grandes cantidades de agua con una calidad no tan alta, permitiendo así la disminución del consumo de agua de primer uso. Por ejemplo, para el lavado de materia prima, subproductos o productos finales y para los sistemas de enfriamiento se requieren generalmente grandes cantidades de agua con una calidad no tan estricta. Por otro lado, existen procesos donde se requiere de una alta calidad de agua, por ejemplo para preparación de soluciones de reactivos químicos, para los procesos de manufactura o para los sistemas de calentamiento y generación de vapor (National Academy of Sciences, 2012).

La práctica de reúso de agua en el sector industrial ha tomado fuerza debido a la escasez de agua y la alta demanda del sector. En África del sur se han desarrollado dos proyectos para el reúso de aguas residuales tratadas; el primero en la ciudad de Durban, donde se utilizan las aguas residuales tratadas para usos industriales y el segundo proyecto se desarrolló en la Mina Emolahleni; en este caso se reúsan las aguas residuales industriales para suplir la demanda de agua potable. Por otro lado, Singapur, desde la década de 1960, comenzó el reúso de aguas residuales tratadas en el sector industrial y actualmente reúsa casi la totalidad de las aguas residuales tratadas en usos no potables en las industrias, edificios comerciales y edificios de oficinas (Cuadro 15). Por su parte, Australia reúsa el 8% de sus aguas residuales tratadas, de la cual gran parte es usada en lavado de calles y vehículos, industria de la construcción, agua para calderas y agua para sistemas de enfriamiento. Por otro lado, en Europa gran parte de los países tienen problemas de estrés hídrico, por lo cual durante el verano varias ciudades deben hacer reúso de aguas residuales tratadas para diferentes usos, entre estos el industrial.

Cuadro 15. Reúso de agua en Singapur

Reúso de agua en Singapur
(Australian Water recycling Centre of Excellence, 2014b; Seah & Woo, 2012)
Singapur no tiene acuíferos naturales o aguas subterráneas y depende de las precipitaciones de las cuencas y el agua cruda importada del estado de Johor en Malasia. Debido a esto, es vulnerable a la escasez de agua. Con el fin de lograr un suministro de agua sostenible y robusto para satisfacer la creciente demanda de agua, Singapur ha diversificado sus fuentes de agua, entre las cuales se encuentra el reúso de aguas residuales tratadas.

Singapur, desde la década de 1960, comenzó el reúso de aguas residuales tratadas en el sector industrial. En la década de 1960 reusaba 90.000 m³/día de aguas residuales tratadas. Desde febrero de 2003, Singapur reusa casi la totalidad de las aguas residuales tratadas en usos no potables en las industrias, edificios comerciales y edificios de oficinas. En el año 2012 las aguas residuales tratadas suplían el 10% de la demanda total de agua de Singapur.

Uno de los principales proyectos desarrollado en el país es NEWater, el cual es un pilar de la estrategia de sostenibilidad de agua de Singapur. Es agua industrial de alta calidad, producida a partir de agua residual municipal que se purifica con tecnologías avanzadas de membrana y desinfección ultravioleta, la cual es entregada a las industrias a través de tuberías diseñadas para tal fin.

El permiso de operación y abastecimiento del proyecto NEWater se basó en los estándares de la OMS y la EPA. Actualmente en Singapur operan cinco plantas que tratan agua residual, con una capacidad total de 554.000 metros cúbicos por día. El agua producida es usada principalmente por la industria, sin embargo, durante períodos secos, se agrega NEWater a los embalses para mezclar con agua cruda. El agua cruda del embalse es tratada en la planta antes de ser suministrada a los consumidores como agua potable de uso doméstico y comercial, constituyendo de esta manera también una fuente de reúso indirecto de agua potable.

En Estados Unidos, el 8% de las aguas residuales tratadas son reusadas y de esta cantidad, el 7% es utilizada para el sector industrial y comercial. Se estima que en América Latina y El Caribe se reúsan 2,4 millones de m³/día de aguas residuales tratadas, de los cuales 345.600 m³/día se utilizan para fines industriales (AIDIS, 2016).

En Brasil, los altos costos del agua de acueducto para abastecer la industria han llevado a evaluar ofertas de las compañías de saneamiento para la compra de efluentes tratados, a precios inferiores a los del agua potable de los sistemas públicos de abastecimiento. En algunas áreas de la región metropolitana de São Paulo el costo del agua a disposición de la industria está en torno a ocho reales por metro cúbico, mientras que el agua de reúso presenta un costo marginal por metro cúbico poco superior a cuatro reales (Hespanhol, n.d.). Uno de los casos más relevantes es el del Polo Petroquímico de la región del ABC en São Paulo, en el cual, desde la década de 1990, se reúsan aguas residuales tratadas, debido a las malas condiciones de disponibilidad de agua presentadas en la zona de la subcuenca del Alto Tietê (Cuadro 16).

Cuadro 16. Caso de reúso en el sector de la industria brasilera.

Proyecto Aquapolo (Brasil)

(Aquapolo, 2013)

El Polo Petroquímico de la región del ABC Paulista, se compone de 13 industrias, cuyos productos, como etileno, propileno y polietileno, son materias primas para la fabricación de resinas, gomas, pinturas y plásticos. Se encuentra en la región perteneciente a la subcuenca del Alto Tietê, considerada la segunda más precaria del mundo en términos de recursos hídricos propios para el consumo. La oferta de agua per cápita en la región gira en torno a 130 metros cúbicos por habitantes por año, menos del 10% del índice mínimo considerado por la ONU (2.500 metros cúbicos por habitante al año), lo cual se debe principalmente a la contaminación por el proceso acelerado de ocupación irregular en los alrededores de los manantiales.

Ante el cuadro de escasez hídrica de la región, en 2009 se constituyó la empresa Aquapolo Ambiental SA, con el propósito de producir agua industrial de alta calidad a partir de aguas residuales domésticas generadas en la Cuenca del ABC, y proveerla al Polo petroquímico, el cual es el mayor consumidor de agua potable de la región.

El proyecto Aquapolo es el mayor emprendimiento para la producción de agua de reúso industrial en América del Sur, y el quinto más grande del planeta. Se tratan 650 l/s de aguas residuales, que posteriormente son utilizadas en torres de enfriamiento y también como materia prima para producción de vapor, en sustitución del agua potable. La planta fue construida en un área de 15.000 m² y consta de tratamiento terciario de membrana sumergida, tecnología de última generación que remueve partes de la materia orgánica, nutrientes como fósforo y nitrógeno y compuestos inorgánicos como sílice, componentes que no son removidos en un proceso de tratamiento convencional.

Con estas medidas ha habido un ahorro de 6,02 billones de litros de agua por año. Adicionalmente hay un ahorro de cerca de R\$1,86 millones anuales, relacionados con el mantenimiento de intercambiadores de calor, debido a la mejor calidad del agua de reúso en relación a la utilizada anteriormente. La inversión del proyecto fue de 364 millones de reales (338 mil millones de pesos).

Por otro lado, México es el país en América Latina y El Caribe que reúsa el mayor caudal de de aguas residuales tratadas. Desde el año 1956 comenzó a usar aguas residuales tratadas en el sector industrial y actualmente utiliza cerca de 240.000 m³/día de este tipo de agua en el sector (AIDIS, 2016).

En Colombia, el reúso de aguas residuales tratadas en el sector industrial se restringe a los usos establecidos en la Resolución 1207 de 2014, correspondientes a actividades específicas que no requieren altos niveles de calidad como: Intercambio de calor en torres de enfriamiento y calderas, descarga de aparatos sanitarios, limpieza mecánica de vías, riego de vías para el control de material particulado y sistemas de redes contra incendio. Para cada una de estas actividades se establecen ciertos parámetros de calidad que deben cumplir las aguas residuales tratadas; parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, químicos, biocidas, iones, metales, metaloides, no metales y otros.

Adicionalmente, se establecen las distancias mínimas de retiro para el desarrollo del reúso dentro del sector y se aclara que la construcción, operación, mantenimiento y protección de las obras que se requieran para realizar la actividad de reúso son responsabilidad del usuario receptor y deberá contar con los permisos y autorizaciones necesarias.

Por otro lado, en la guía para el ahorro y uso eficiente del agua se menciona el reúso de agua como una de las principales acciones para aumentar el uso eficiente del recurso. Asimismo establecen la importancia de que las empresas comparen sus índices de consumo respecto a otros referentes nacionales e internacionales y comparen los requerimientos de calidad y técnicos de agua para los diferentes procesos, para así determinar las posibilidades de implementar prácticas de reúso o recirculación (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Teniendo en cuenta las especificaciones de la normativa vigente y los referentes a nivel mundial en el tema de reúso dentro del sector industrial, además de los requerimientos de calidad en diferentes procesos industriales, se considera que este sector tiene un importante potencial de reúso en el país

8 SECTOR MINERO

En Colombia, según el Censo Minero se hace extracción de aproximadamente 22 minerales (Ministerio de Minas y Energía, 2012), mientras que la UPME reporta aproximadamente 37 debido a la división de la arcilla en otras categorías (Universidad Industrial de Santander UIS, 2014). En términos hídricos, no todos los minerales tienen la misma importancia y en términos económicos no todos son tan representativos, por lo cual se realizó una priorización a partir de criterios como: distribución espacial, relevancia económica, temas reputacionales, relación con el recurso hídrico y disponibilidad de información (producción, uso y consumo de agua y vertimientos). Así las cosas, se priorizaron el oro y el carbón como los más representativos. Algunos datos de producción y crecimiento de estos minerales se presentan en la Tabla 51.

Tabla 51. Producción y crecimiento de oro y carbón en Colombia

Característica	Oro	Carbón
Distribución espacial (datos de producción del 2015 – SIMCO)	16 departamentos – 151 municipios	10 departamentos – 83 municipios
Producción (2015 – SIMCO)	65,1 ton (mayor productor Antioquia, 42,1% de la producción nacional en 2012)	80,2 millones de ton (mayor productor Cesar, 47,5% de la producción nacional en 2012)
Proyección de crecimiento en el periodo 2010 – 2020	74% (Ministerio de Minas y Energía, n.d.)	74% (Ministerio de Minas y Energía, n.d.)
Valor exportaciones (2012)	USD 3.385,3 millones (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2014b)	USD 7.805 millones (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2014b)

8.1 EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD

En cuanto a la eficiencia y productividad del agua para el sector minero, específicamente para oro y carbón, se identifican 11 factores influyentes sobre los cuales se deberían orientar acciones estratégicas para mejorar la relación minería - agua. Estos fueron priorizados y complementados por expertos en el tema minero en el primer Taller Comité Consultivo “Diagnóstico y Priorización” (Tabla 52).

Tabla 52. Principales factores que inciden en la eficiencia y productividad del agua en el sector minero (oro y carbón)

Criterio	Factor	Descripción
Político	Institucionalidad	La actividad minera es tan diversa y extensa en el territorio que desborda la capacidad técnica, operativa e institucional de los entes territoriales (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2015). Esta situación, dificulta el proceso de control y en consecuencia no se tiene un seguimiento permanente a las variables que pueden incidir en la productividad del agua, tal como el uso de agua en el proceso, los volúmenes de agua captados y concesionados, el cumplimiento de los criterios de calidad por los vertimientos, la legalidad de las conexiones de agua, la confiabilidad de la información reportada por los mineros y el uso de fuentes alternativas, entre otras (Contraloría General de la República, 2016a).
Tecnológico	Implementación de procesos de producción más limpia y sistemas de tratamiento de aguas residuales (investigación)	Se han identificado tecnologías para reducir el uso de sustancias químicas (procesos de producción más limpia) y para el tratamiento de las aguas residuales generadas en la minería de oro y carbón (Hernández, Sanz, & Mancebo, 2014; Ministerio de Minas y Energía, 2011, 2013, Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2014a, 2015a, 2015c). Su implementación puede considerarse deficiente, especialmente en la pequeña y mediana minería. Como posibles variables que afectan la implementación de estas tecnologías y de los STAR están los costos, el desconocimiento sobre dichas tecnologías, desinterés en implementarlas y carencia de incentivos para su implementación. La baja implementación de estos sistemas genera que los vertimientos lleguen a las fuentes hídricas con concentraciones de contaminantes que pueden exceder los criterios de calidad definidos en la Resolución 631 de 2015.
Ambiental	Disponibilidad hídrica (restricciones hídricas a nivel de SZH)	En Colombia ya se tienen identificadas a nivel de subzona hidrográfica, las cuencas que presentan restricciones por disponibilidad hídrica (IDEAM, 2015a). Estas restricciones pueden afectar el desarrollo de la actividad minera ya sea porque se puede reducir la oferta hídrica o porque la calidad de las fuentes de abastecimiento implica tratamientos previos al proceso o tratamientos más costosos previos a los vertimientos.
	Limitada información sobre los sistemas hídricos (monitoreo integral)	Según los asistentes al Primer Taller Comité Consultivo “Diagnóstico y Priorización”, en Colombia se presenta un vacío de información de los sistemas hídricos, especialmente de los sistemas superficiales en la Orinoquía y la Amazonía, en donde hay deficiencias en la red de monitoreo. En el caso de las fuentes subterráneas se tiene un desconocimiento general de las dinámicas propias de los sistemas acuíferos.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del Primer Taller Comité Consultivo “Diagnóstico y Priorización”

8.2 VERTIMIENTOS EN EL SECTOR MINERO

Se han identificado tres estudios en Colombia que dan cuenta de las características de los vertimientos generados en la minería de oro y carbón. En el ENA 2014 se estimó para el año 2012 una carga vertida de 205 toneladas de Hg al suelo y al agua (IDEAM, 2015a), de los cuales el 72,5% se relaciona al beneficio de oro. Por su parte, en el estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro, se estimó una descarga de 187 toneladas de Hg (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2014a). Así mismo, la UPME y la Universidad de Córdoba, caracterizaron los vertimientos de 41 minas de oro y 17 minas de carbón distribuidas en todo Colombia, tomando como base los parámetros definidos en la Resolución 631 de 2015. En esta caracterización se evidenciaron otras sustancias que

anteriormente no habían sido evaluadas, entre ellas, metales pesados como el cromo, plomo, zinc, cobre, arsénico, níquel, **los cuales pueden tomar mayor importancia una vez entre en vigencia la prohibición del uso del Hg para el caso de la minería de oro** (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2015c).

Adicionalmente, En la guía para el manejo adecuado de los vertimientos generados en la minería de oro y carbón (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2015a) se analiza cada una de las etapas y operaciones en función de las características de los vertimientos (Tabla 53). En esta guía se hacen recomendaciones para el control de los efluentes, enfocadas principalmente en la caracterización de los vertimientos, en la reducción de la carga contaminante asociada a sólidos suspendidos, metales pesados y en la neutralización de pH. Para el control de dichos contaminantes se proponen sistemas de tratamiento biológicos y físico químicos y se definen parámetros de diseño.

Tabla 53. Etapas y operaciones que generan vertimientos en la minería de oro y carbón

Mineral	Tipo de minería	Etapas – operación crítica en la generación de vertimientos	Descripción del vertimiento
Oro	Subterránea	Explotación - Desagüe	El agua proveniente de los socavones contiene contaminantes asociados a los elementos que contengan la roca de caja del depósito mineral como hierro, plomo, sílice, arsénico, entre otros, además de traer una cantidad de sólidos suspendidos.
		Beneficio - Concentración	Es la operación en la etapa de beneficio que genera mayor vertimiento, sin embargo, éste contiene menos sustancias peligrosas que la operación de cianuración
		Beneficio - Cianuración	El vertimiento generado es de mucho cuidado debido a la presencia de cianuro (CN)
	Cielo abierto	Beneficio - Concentración	Aporte de sólidos suspendidos. En algunos casos los vertimientos contienen CN.
Carbón	Subterránea	Explotación - Desagüe	El agua proveniente de los socavones contiene contaminantes asociados a los elementos que contengan la roca de caja del depósito mineral como hierro, plomo, sílice, arsénico, entre otros, además de traer una cantidad de sólidos suspendidos.
	Cielo abierto	Beneficio - Lavado	Los vertimientos contienen cenizas e impurezas

Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2015a)

A partir de la información de la guía de manejo, se definen los principales factores que inciden en los vertimientos¹⁰⁹:

- Las aguas de mina presentan **altos contenidos de metales pesados y sólidos suspendidos**, sin embargo, la presencia de estas sustancias se da por las condiciones de la roca que está en contacto con el agua subterránea y no por el uso de sustancias químicas en el proceso. Por lo tanto, para evitar que estos vertimientos generen problemas ambientales, es necesario que **ingresen a un sistema de tratamiento diseñado de acuerdo con los contaminantes presentes en el vertimiento**.

¹⁰⁹ El factor institucional también tiene incidencia en las características de los vertimientos, dicho factor se explicó en el numeral 7.1

- Uso de sustancias químicas en la etapa de beneficio: **para separar el oro, se utilizan sustancias como el Hg y el CN.** El Hg quedará prohibido en la minería a partir del año 2018 (Ley 1658 de 2013), mientras entra en vigencia esta norma, **se requiere su reducción o recuperación para disminuir sus descargas.** Para el Hg que no se alcanza a recuperar se deben tener sistemas de tratamiento adecuados para este tipo de contaminante. En el caso del CN, **se requiere implementar sistemas de tratamiento para llevar sus concentraciones en los vertimientos hasta los niveles de calidad exigidos en la resolución 631 de 2015.** Adicionalmente se deben generar alternativas para el beneficio del oro sin la necesidad de usar este tipo de sustancias.
- Temas culturales: en la pequeña y mediana minería los temas culturales inciden en las características de los vertimientos, por ejemplo, se tienen creencias que **en la medida que adicionen mayor cantidad de Hg, se obtendrán mayores cantidades de oro.** En la operación de amalgamación **en algunos casos solo el 10% del Hg se combina con el oro para formar la amalgama** (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA, 2008). Esta situación también se identificó en (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2014a), donde se define que la minería de filón **utiliza en promedio 36,04 g de Hg por gramo de oro y las pérdidas son de 8 g de Hg por gramo de oro (22% de pérdidas).** De acuerdo al documento Actuación Especial Minería Ilegal (Contraloría General de la República, 2016a), se indica que para la jurisdicción de CORANTIOQUIA “los esfuerzos de la Corporación a través de las capacitaciones no han sido efectivos para prevenir la minería ilegal, porque en contraposición se encuentra que esta actividad es más lucrativa al no estar bajo la supervisión del Estado y sus instituciones, dado que no se asumen obligaciones para el desarrollo de las actividades mineras y el aprovechamiento del yacimiento; no cuenta con obligaciones para controlar, mitigar o restaurar las afectaciones causadas al medio ambiente; no paga tributos al Estado por el aprovechamiento de los recursos de la Nación y tampoco ajusta los vínculos laborales a la legalidad existente. Por lo anterior, es poco probable que quienes laboran de manera ilegal estén interesados en buscar a través de las capacitaciones el inicio de un camino que los conduzca a la legalidad”, esto se resume en que de las 535 unidades mineras ilegales identificadas en la jurisdicción de la Corporación solo 12 solicitudes han obtenido el instrumento ambiental (Contraloría General de la República, 2016a). Se destaca en Antioquia la construcción del Centro de Formación Minero Ambiental (municipio de El Bagre, Bajo Cauca), que para el año 2015 ya había formado a aproximadamente 15 mil aprendices. La apuesta más importante con este proyecto es la formalización del sector desde la formación, aunque también se adelanta un proceso para formar personas en otras actividades económicas orientado principalmente a barequeros¹¹⁰.

Otro aspecto relacionado a temas culturales, consiste en que aunque se han identificado tecnologías para eliminar el uso del Hg en el beneficio del oro especialmente en la pequeña minería (Hernández et al., 2014; Ministerio de Minas y Energía, 2011, 2013, Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2007, 2014a, 2015a, 2015b, 2015c), **el problema radica en que los mineros creen que al no utilizar Hg, la recuperación de oro es menor.** Sumado a esto, el precio del Hg no es un factor relevante en la cadena de costos por lo que puede ser utilizado sin restricciones de tipo económico. También se debe considerar **el desconocimiento de estas tecnologías principalmente en la pequeña minería y en los costos de implementación de las mismas.**

¹¹⁰ Tomado de <http://www.sena.edu.co/es-co/Noticias/Paginas/noticia.aspx?IdNoticia=222>

En cuanto a indicadores de eficiencia y productividad para los vertimientos, se identificaron dos índices que relacionan el vertimiento en función de su cantidad: porcentaje del volumen total de aguas residuales que no se reutiliza y la tasa de agua reciclada (Department of Water and Sanitation & Africa, 2014). **Para ambos indicadores no se dispone de información que permita hacer las estimaciones.**

No se han identificado indicadores que estimen la eficiencia y la productividad en términos de la calidad de los vertimientos¹¹¹ aspecto más relevante para la minería por las características de sus efluentes (numeral 8.2). Algunos indicadores que miden el impacto en términos de calidad y para los cuales se han realizado estimaciones en Colombia son el IACAL (IDEAM, 2015a) y el indicador de Huella Hídrica Gris HHG¹¹², implementado por la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2016). Sin embargo, las aplicaciones de estos indicadores han tenido las siguientes dificultades:

- Caracterizaciones de metales pesados: el IACAL estimado en el ENA 2014, solo consideró la carga vertida de mercurio Hg asociado a la minería de oro, dejando de lado por falta de información otros metales pesados que se presentan en los vertimientos de oro y carbón. Incluir estas variables en el IACAL puede aumentar las SZH con restricciones hídricas en Colombia.
- Muestra estadísticamente no representativa: la base de datos del estudio realizado por la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2016) no corresponden a una muestra representativa del sector, por lo tanto, a partir de estos resultados no se pueden generar conclusiones para toda la minería de oro y carbón en relación a la HHG.
- **Objetivos de calidad de las fuentes hídricas:** para determinar la incidencia de los vertimientos en las fuentes hídricas a partir de la HHG, **se necesitan umbrales o concentraciones máximas permitidas en cada fuente hídrica de acuerdo a los usos del agua.** Actualmente estos umbrales solo están definidos para las cuencas que son objeto de reglamentación (PORH).
- Variables asociadas a la carga de vertimientos: ambos indicadores requieren información sobre la carga de contaminantes a la entrada y salida de la mina. Las características físico químicas del agua a la entrada del proceso generalmente no son monitoreadas o en caso que tengan caracterizaciones, éstas no son reportados ante ninguna entidad pública, por lo tanto, es información que no existe o que no está disponible, lo que dificulta la aplicación de dichos indicadores.

Otro aspecto a considerar como condicionante de la eficiencia, productividad del agua y en la calidad de los vertimientos **está relacionado con las restricciones hídricas que ya se tienen identificadas a nivel de SZH.** Estas restricciones, pueden obligar a las autoridades ambientales **a aumentar la eficiencia para determinadas actividades** (menos cantidad de agua por unidad producida) **y aumentar las restricciones asociadas a la calidad de los vertimientos** (menores concentraciones en los vertimientos lo que implica mayores costos de operación).

¹¹¹ Un aspecto a considerar en el programa de crecimiento verde corresponde a definir indicadores de eficiencia y productividad relacionados a la carga contaminante.

¹¹² Volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes por parte de un cuerpo receptor, tomando como referencia las normas de calidad ambiental, asociando los límites establecidos a una calidad buena del agua para el ambiente y para las personas (Zeng et al., 2012). No es un indicador de eficiencia, pero sí permite estimar el impacto de los vertimientos en las fuentes hídricas.

8.3 REÚSO

Para el sector minero, **no se tiene definido claramente a nivel mundial cuál es su participación en el reúso de agua**. Sin embargo, cuando se analizan las actividades en las que se reúsa agua, se establecen por ejemplo el lavado de camiones y maquinaria pesada, control de polvo en vías, descarga de inodoros, que son actividades comunes a la minería. En el estudio Guidelines for water reuse (United States Environmental Protection Agency EPA, 2012), **se propone como actividad potencial para el reúso de agua la extracción de combustibles de origen fósil, lo que significaría reúso en la minería de carbón**, pero minerales como el oro y materiales de construcción no quedarían incluidos.

En el caso de Colombia, la Resolución 1207 de 2014 evidencia la misma situación, **no se define claramente al sector minero como usuario de agua para reúso, solo se proponen algunas actividades que son comunes a la minería** (descarga de aparatos sanitarios, limpieza mecánica de vías, riego de vías para el control de material particulado y para sistemas de redes contraincendios), pero se deja de lado otras actividades como las etapas de extracción y beneficio de minerales en las cuales se pueden generar altas demandas de agua¹¹³. Adicionalmente, en esta Resolución **no se establecen incentivos que promuevan el reúso del agua, ni articulación con instrumentos económicos como la TUA y TR**¹¹⁴.

Se identificaron experiencias que registran como las empresas han implementado estrategias de uso eficiente del agua y en la reducción de los vertimientos (Cuadro 17, Cuadro 18, Cuadro 19, Cuadro 20 y Cuadro 21). **La principal motivación para la implementación de estas estrategias son las restricciones hídricas de las zonas donde se ubican las empresas mineras**. Estos casos también son importantes para el contexto colombiano, ya que a partir de ellos se pueden proponer modificaciones a la normativa colombiana vigente, tal es el caso de la Resolución 1207 de 2014, en la cual no se evidencia claramente el responsable del tratamiento de las aguas residuales para reúso, por lo tanto, los casos exitosos permiten definir que tanto el receptor como el generador pueden asumir esta responsabilidad de acuerdo con sus propias necesidades.

Cuadro 17. Caso de éxito. Informe de sustentabilidad de la empresa Teck.

Implementación del indicador de Intensidad en el Uso del Agua en la empresa Teck (Teck, 2013)

Considerando que el agua es un recurso vital para el desarrollo de la actividad minera, la empresa de origen canadiense Teck, que tiene una de sus minas de carbón en Chile, ha venido implementado una estrategia para mejorar la eficiencia en el uso del agua considerando las restricciones hídricas que se presentan en el país. Para lograr esto elaboró inicialmente su balance hídrico de la empresa, en el cual se calculó que el 63% del agua utilizada corresponde a agua reutilizada. También se estimó el índice de Intensidad en el uso del agua para la operación de carbón siderúrgico (0,41 m³/ton de carbón procesado) y en las operaciones de molienda y flotación (0,35 m³/ton de mineral procesado).

¹¹³ En la minería de oro, la operación de clasificación demanda el 96% del agua de todo el proceso (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2015c)

¹¹⁴ Según datos de la Contraloría General de la Nación en el periodo 2010 – 2015 en promedio se obtuvieron recursos por TUA de aproximadamente \$14.000 millones de pesos por año y para el mismo periodo el promedio anual de recaudo de la TR fue de \$85.000 millones de pesos (Contraloría General de la República, 2016b)

Cuadro 18. Caso de éxito. Viabilidad económica para tratar y recircular aguas residuales.

Análisis de la viabilidad económica de un sistema de tratamiento y recirculación de aguas residuales (M.C. Miguel Escamilla López, Dr. Jorge Meza Jiménez, M.A. Ricardo Llamas Cabello, 2013)

Este caso muestra el análisis económico realizado para la recuperación del agua residual de un proceso en una mina de hierro ubicada al norte del estado de Colima (México), ya que durante la época de estiaje no es posible cumplir con el programa de producción, debido a la escasez de agua de pozo. El agua residual a recuperar no contiene reactivos químicos, sólo sólidos suspendidos que una vez sedimentados generan agua totalmente limpia 100% reutilizable. Los resultados obtenidos muestran la viabilidad económica del proyecto, ya que los indicadores establecen un valor presente neto de USD 2'053,982, una TIR de la inversión del 58,3% y un periodo de recuperación de 2 años y 6 meses.

Cuadro 19. Caso de éxito. Tratamiento de aguas residuales para reúso en abastecimiento doméstico.

Aplicación de un sistema de reúso de agua para abastecimiento doméstico, Emalahleni - Sudáfrica (ICMM, n.d.; United States Environmental Protection Agency EPA, 2012)

Las aguas residuales generadas por dos empresas de carbón son tratadas mediante un sistema denominado "advanced membrane desalination". Posterior al tratamiento de las aguas residuales, éstas son entregadas al sistema de acueducto del municipio de Emalahleni para abastecer a una población de 80.000 habitantes. La decisión de tratar las aguas residuales de las minas y entregarlas al sistema de abastecimiento municipal fue motivada por la escasez de agua en la zona y por temas reputacionales y sociales. Este es un claro referente de que las aguas residuales generadas por minas, pueden ser reusadas en actividades que requieren altos estándares de calidad¹¹⁵. A su vez, también se abre la posibilidad de que la actividad minera pueda reusar agua proveniente de otras empresas mineras. Como datos generales, se tiene que la PTAR tiene capacidad para tratar 30 millones de litros/día de agua residual y suministrar diariamente 16 millones de litros al sistema de abastecimiento. El costo del tratamiento es de USD 1,5 por metro cúbico y el valor al cual se comercializa al sistema de abastecimiento es de USD 1,0 por metro cúbico. Esto supone que las empresas mineras asuman el diferencial, pero se argumenta que esta alianza trae otro tipo de beneficios sociales y ambientales (ICMM, n.d.; United States Environmental Protection Agency EPA, 2012).

Cuadro 20. Caso de éxito. Tratamiento de aguas residuales para reúso en empresa minera.

Reúso de agua en empresa minera (Eduardo Chaparro A., 2007; Industrias Peñoles Peñoles SAB de CV, 2016)

Se identificó en México a la empresa Grupo Peñoles, en la cual tratan aguas residuales domésticas provenientes del municipio de Torreón para luego ser incorporadas al proceso minero. Como datos generales para el año 2016 el uso de agua fue 12,4 millones de metros cúbicos, de los cuales 5,8 millones fueron correspondientes a aguas reusadas (tratadas por la empresa) que corresponden al 47% del total de agua usada. Este sistema de tratamiento ha sido implementado desde el año 2005 y hasta el 2016 han tratado 66,7 millones de metros cúbicos, suficientes para abastecer una población de 660.000 habitantes durante un año. Como principales motivaciones para hacer un uso eficiente del agua, es que la empresa se encuentra ubicada al norte de México en una zona semiárida donde la precipitación no supera los 200 mm por año. A su vez, esta empresa hace tratamiento de sus aguas residuales (la meta es utilizar el 100% de las aguas tratadas en el sistema productivo), lo que le permite hacer recirculación de la misma, esta situación abre la posibilidad que la normativa en Colombia permita que las empresas mineras puedan ser receptoras de aguas residuales generadas en otras minas para utilizarlas en sus operaciones.

¹¹⁵ El agua suministrada por las empresas mineras al sistema de abastecimiento debe cumplir con los estándares de calidad definidos por la South African National Standard for Drinking Water Quality (SANS O241 Class O potable water) and uses the High Recovery Precipitating Reverse Osmosis (HIPRO)

Cuadro 21. Caso de éxito. Gestión eficiente en el uso del agua de la empresa CODELCO.

Sistemas para el uso eficiente del agua en minería de cobre, empresa CODELCO (CODELCO, 2015)

Aunque es una empresa dedicada a la extracción de cobre, se considera un caso exitoso, ya que desde 2008 vienen evaluando su desempeño en términos de recirculación de agua en su operación. Se observa como en 2015 alcanza en promedio un porcentaje de recirculación del 78,5% que corresponden a 649 millones de metros cúbicos de agua que no se extraen de fuentes hídricas superficiales y subterráneas para todas las minas que hacen parte de la empresa CODELCO. Se destaca como la mina Radomiro Tomic alcanzó un porcentaje de recirculación del 90,6%. En el balance hídrico de 2015, también se evidencia el uso de agua lluvia (3,4 millones de metros cúbicos de agua), 8,6 millones de metros cúbicos de agua recibidos de terceros (agua de reúso) y el agua de mina (13,3 millones de metros cúbicos), lo que demuestra que la estrategia de eficiencia abarca todas las opciones de uso eficiente del recurso y la disminución de las cargas contaminantes.

Captación y recirculación de agua 2015 (miles de m³)

		Radomiro Tomic	Chuquicamata	Ministro Hales	Gabriela Mistral	Salvador	Andina	Ventanas	El Teniente	Total
Captación por fuente	Agua superficial	(-)	58.364	(-)	(-)	15.708	20.526	(-)	41.577	136.175
	Agua subterránea	(-)	(-)	7.862	5.567	5.748	3.797	906	553	24.435
	Agua mina	7	374	1.318	(-)	(-)	6.548	(-)	5.140	13.387
	Agua municipal	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	6	427	(-)	434
	Agua lluvias	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	3.431	(-)	(-)	3.431
	Total captado	7	58.738	9.180	5.567	21.457	34.309	1.334	47.271	177.862
Agua recibida de terceros		8.348	NA	283	NA	NA	NA	NA	NA	8.631
Recirculación	Total recirculado	80.269	373.423	2.572	55.536	25.322	35.851	71	75.846	648.890
	% de recirculación	90,6	88,1	21,4	90,9	54,1	51,1	5,1	61,6	78,5

9 ANÁLISIS TERRITORIAL

9.1 DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN COLOMBIA

Colombia es reconocido por su riqueza en agua, su rendimiento hídrico (63 L/s-Km^2) es seis veces mayor al promedio mundial y tres veces mayor al de Latinoamérica, no obstante, estos datos agregados no representan adecuadamente la disponibilidad de agua en el país. Según el ENA 2014, aproximadamente el 80% de la población se encuentra en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, que dispone de solo el 20% de la oferta hídrica, mientras que en áreas con mayor oferta de agua se ubica el 20% de la población. Adicionalmente, los indicadores que resaltan a Colombia como un país rico en agua, en algunos casos solo consideran la oferta hídrica y no tienen en cuenta aspectos como la calidad del agua, la cual es determinante en la disponibilidad.

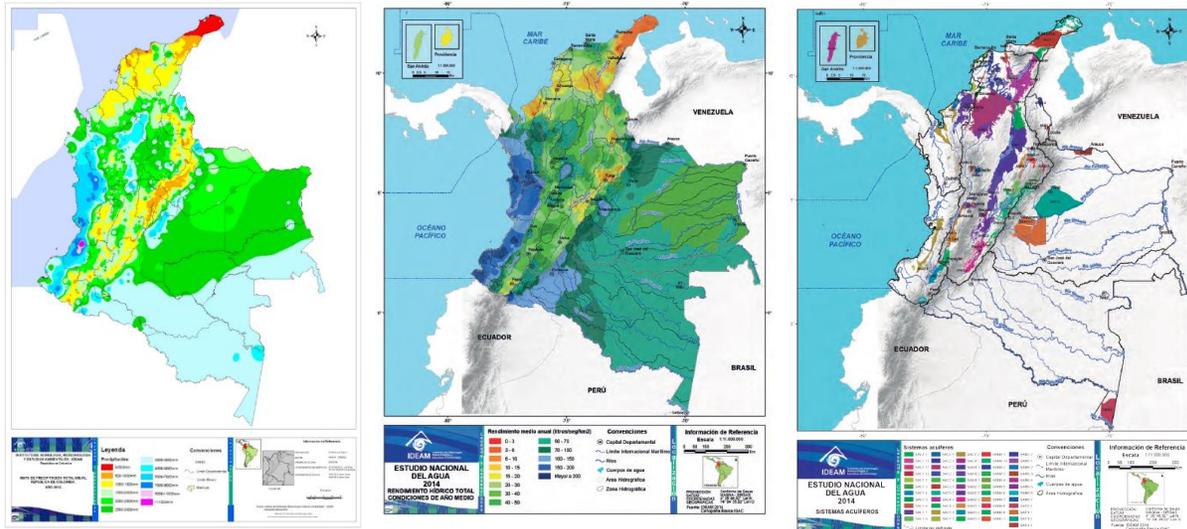
La disponibilidad hídrica debe analizarse en función de dos variables, la oferta y la calidad del agua. La oferta hace referencia a la cantidad de agua superficial y subterránea¹¹⁶ disponible para los ecosistemas y las actividades antrópicas, mientras que la calidad considera características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua y las restricciones que se pueden presentar para su uso en función de sus características.

Otros aspectos que inciden en la disponibilidad son las variaciones temporales y el uso por los sectores económicos. En Colombia, la distribución temporal de la precipitación presenta básicamente dos comportamientos, en algunas regiones un régimen bimodal (durante el año se dan dos temporadas de lluvias) y en otras regiones, un régimen unimodal (una sola temporada de lluvias al año), estos comportamientos definen la variación temporal de la oferta y el potencial de aprovechamiento de este recurso¹¹⁷ por los sectores económicos, quienes a su vez inciden en la disponibilidad de agua a través de su uso, ya sea por las extracciones, consumos o vertimientos.

En la Figura 44 y Figura 45 se presentan algunos datos para Colombia relacionados a la oferta hídrica y la precipitación. Se destaca en la Figura 45, la distribución temporal de la precipitación en diferentes zonas del país, en ellas se identifican comportamientos bimodales (región Medio Cauca y Alto Nechí), y comportamientos unimodales (región río Arauca).

¹¹⁶ De acuerdo al ENA 2014 (IDEAM, 2015b), el 12% de la demanda hídrica de Colombia proviene de fuentes hídricas subterráneas, sin embargo, se tiene un desconocimiento general del comportamiento hidrogeológico de los sistemas acuíferos en Colombia.

¹¹⁷ El potencial de aprovechamiento del agua puede aumentar dependiendo de la distribución espacial y temporal de la precipitación. En una zona con un régimen bimodal, se tendrá la opción de utilizar o almacenar agua lluvia durante dos temporadas al año, mientras que en una zona con régimen unimodal se restringe más el acceso a esta fuente de abastecimiento.



Precipitación promedio anual en Colombia, 2012

Oferta hídrica disponible en Colombia, 2012

Sistemas acuíferos en Colombia, 2012

Área hidrográfica	Oferta total (Mm ³)	Caudal (m ³ /s)	Porcentaje de la oferta
1 Caribe	182.865	5.799	9,1
2 Magdalena - Cauca	271.049	8.595	13,5
3 Orinoco	529.469	16.789	26,3
4 Amazonas	745.070	23.626	37,0
5 Pacífico	283.201	8.980*	14,1
Total	2.011.655	63.789	100,0

Figura 44. Distribución espacial de la precipitación y de la oferta hídrica en Colombia
Fuente: (IDEAM, 2015b)

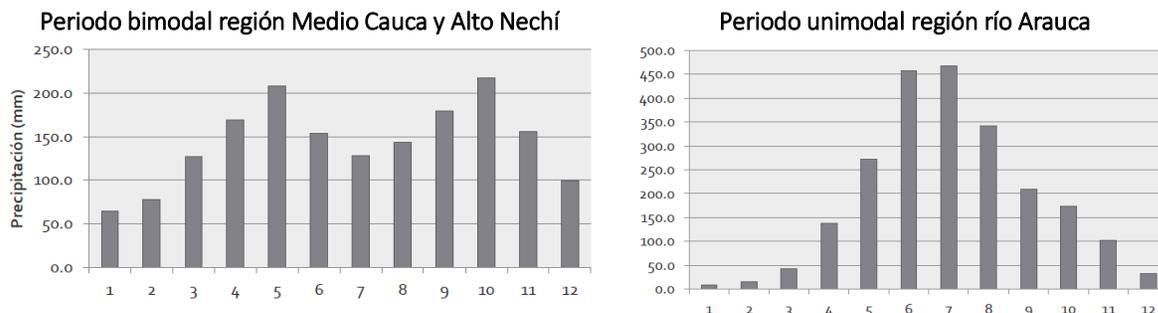


Figura 45. Distribución temporal de la precipitación en diferentes zonas de Colombia
Fuente: (IDEAM, 2014b)

En Colombia, una serie de indicadores a escala de SZH han permitido analizar el estado del recurso hídrico (Figura 46); algunos de ellos dan idea del régimen hídrico natural y otros del impacto antrópico y las actividades económicas. Una primera aproximación a la priorización de SZH según el estado del recurso hídrico fue realizada para el DNP (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2017a), con el fin de identificar regiones en donde es prioritario aumentar la productividad del uso del agua en los principales sectores usuarios.

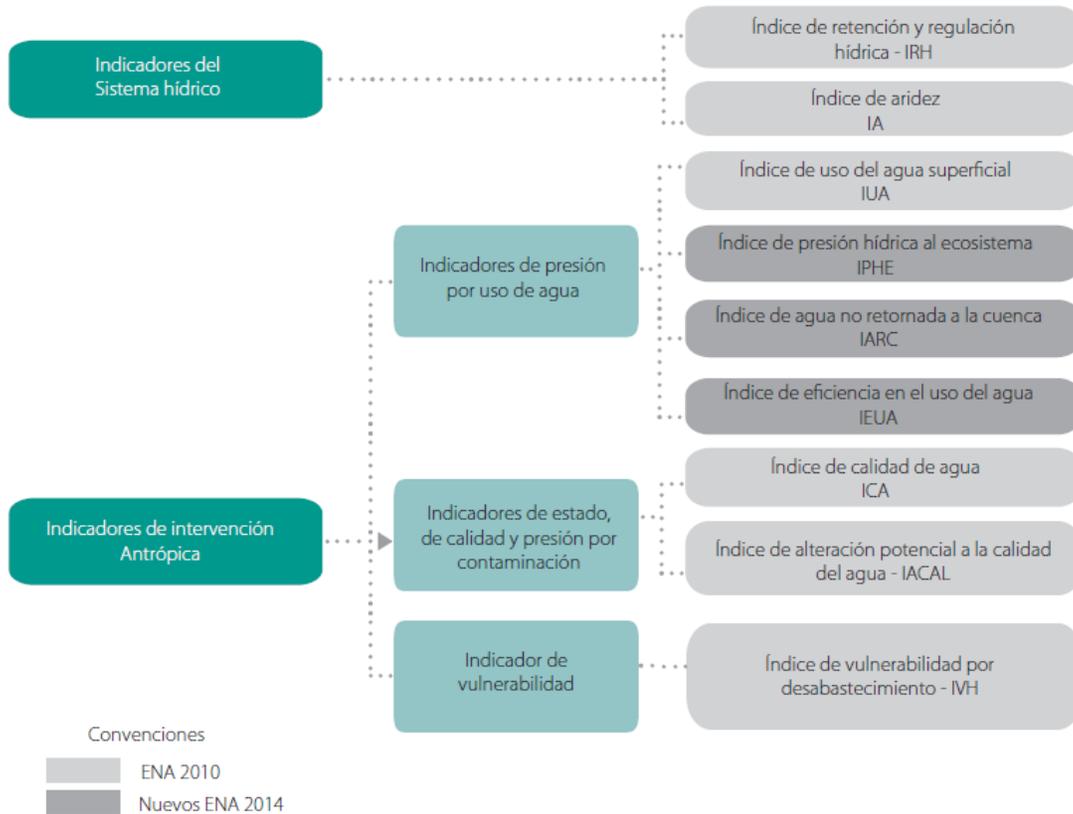


Figura 46. Sistema de indicadores hídricos para ENA 2014

Fuente: (IDEAM, 2015b)

En dicho reporte, se realiza un análisis espacial multicriterio, considerando las SZH con mayor oportunidad para mejorar la productividad del agua evaluando para la oferta de agua el Índice de Aridez (IA), para el manejo del recurso el Índice por Uso del Agua (IUA) y el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento (IVH) e involucro las pérdidas sectoriales con los datos reportados de municipios que presentaron pérdidas agropecuarias o desabastecimiento en el Fenómeno El Niño 2015-2016. Los índices empleados fueron obtenidos del ENA 2014 (IDEAM, 2015b), mientras que la información económica se obtuvo tanto del ENA 2014 como de la Cuenta Ambiental y Económica del agua (DANE & IDEAM, 2015b), las afectaciones causadas por el Fenómeno El Niño, fueron extraídas del mapa de afectación de la Unidad de Gestión del Riesgo de Desastres (2016) y de los reportes realizados por los municipios.

Los resultados encontrados por el DNP (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2017a) mostraron 24 SZH priorizadas según el IA, las cuales presentaron más del 30% de su área con valores superiores a 0,40 en este indicador. Por su parte, mediante el IUA y el IVH se identificaron las SZH en categorías “Alto” y “Muy Alto”; el IUA permitió priorizar 45 SZH y el IVH 43. Esta priorización arrojó una coincidencia del 70% en las SZH, por lo cual solo se tuvo en cuenta el IVH en la priorización final. Según los reportes de las afectaciones del Fenómeno El Niño 2015-2016, se identificaron 237 municipios afectados por desabastecimiento, los cuales se localizan en 91 SZH, mientras que 292 municipios reportaron pérdidas agropecuarias. El análisis espacial realizado resultó en la priorización de 112 SZH de las 316 existentes

en el territorio colombiano. Distribuidas en las Área Hidrográfica (AH) Caribe 32 SZH priorizadas principalmente por el desabastecimiento de acueductos; mientras que en el AH Magdalena-Cauca se priorizaron 97 SZH en donde la principal problemática fueron las pérdidas agropecuarias. En las AH Orinoco, Amazonas y Pacífico, se priorizaron 8, 2 y 14 SZH respectivamente, el principal factor de priorización fueron las pérdidas agropecuarias (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2017a).

Esta consultoría aprovecho el trabajo realizado por el DNP considerando por una parte los índices que describen el manejo del recurso hídrico a nivel de SZH como son: el Índice por Uso del Agua (IUA) y el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento (IVH), pero ponderando el IUA de mayor manera frente al IVH ya que la correlación entre estos indicadores es muy alta¹¹⁸ y porque se observa que este índice al representar la relación entre oferta y demanda, puede describir de mejor manera el comportamiento futuro de implementación de las prácticas de reúso y recirculación.

Ecuación 12. Determinación del Índice por Uso del Agua (IUA) (IDEAM, 2015b)

$$IUA = Dh/Oh * 100$$

Donde: Dh: demanda hídrica sectorial

Oh: Oferta hídrica superficial disponible

La productividad del agua, como se mencionó en el numeral 2.1, puede incrementarse al disminuir la demanda del recurso sin reducir el número de elementos producidos, o aumentar las unidades producidas sin aumentar el consumo. En este caso el IUA en su numerador involucra la demanda hídrica sectorial (Dh), esta demanda puede verse disminuida en los procesos productivos con la implementación de medidas de recirculación puesto que mantiene un volumen fijo en el ciclo de producción requiriendo menor extracción. La oferta hídrica superficial disponible puede aumentar cuando entre sectores o procesos productivos diferentes se aprovecha el agua vertida para ser incorporada en un nuevo proceso o sector.

Este análisis territorial para determinar las SZH prioritarias en la implementación de medidas encaminadas a mejorar la eficiencia del agua por la presión de uso a la que se encuentran sometidas, no revelan necesariamente aquellas SZH, en donde la población pueda ver disminuido su acceso a agua de calidad para uso doméstico, salvo cuando la presión de los demás sectores se acerca a la oferta. Por esta razón, esta consultoría toma en consideración el Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL); que da una idea de la capacidad de los cuerpos de agua para asimilar cargas contaminantes por dilución (Figura 47).

¹¹⁸ El Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento IVH se estima aplicando una reclasificación matricial de: el Índice del Uso del agua (IUA) y el Índice de regulación hídrica (IRH)

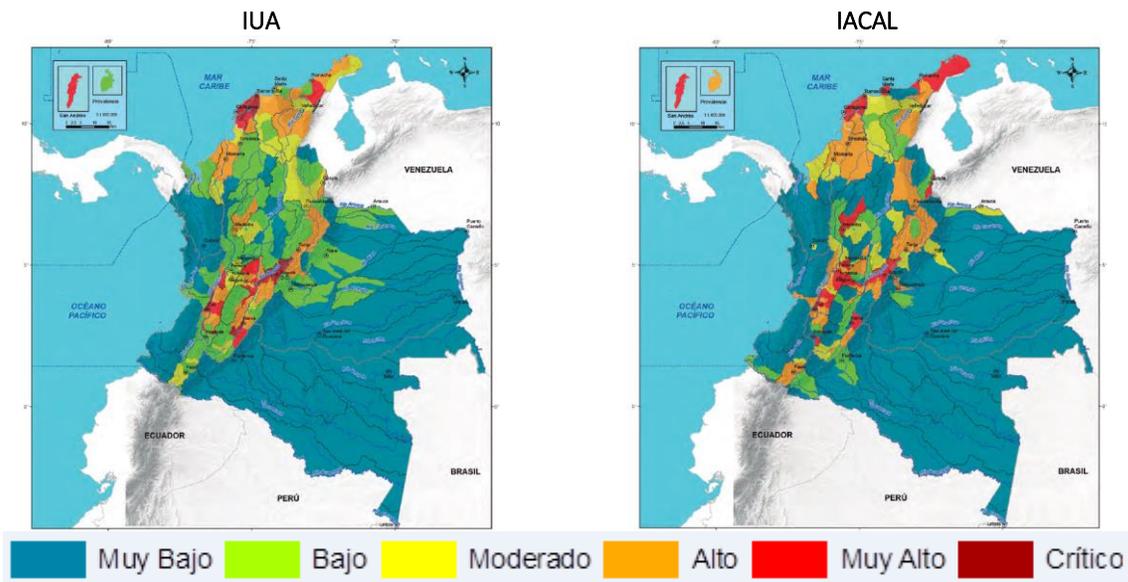


Figura 47. Clasificación de las SZH de acuerdo a los indicadores IUA e IACAL
Fuente: (IDEAM, 2015b)

9.2 PRIORIZACIÓN DE SUBZONAS HIDROGRÁFICAS PARA EL REÚSO Y RECIRCULACIÓN DEL AGUA

Las subzonas hidrográficas que han sido priorizadas como aquellas con potencial de reúso o recirculación, son aquellas que presentan algún tipo de criticidad en el IUA. Según el ENA 2014, existen 24 SZH (Tabla 54) en Colombia que presentan una calificación “Muy alto” o “Crítico” en este índice. La categoría Muy Alto indica que la demanda total está entre el 50 % y el 100 % de la oferta disponible, una vez descontada la oferta correspondiente al caudal ambiental en la misma unidad de análisis en que se considera la oferta hídrica. La condición crítica indica que la demanda es superior al 100 % de la oferta disponible, lo que quiere decir que no se puede satisfacer completamente la demanda aprovechando la totalidad del recurso hídrico superficial.

En la Tabla 54, se presentan las 24 SZH priorizadas según este indicador, y además se marcan con una X las SZH que también presentan criticidad (categoría “muy alta” o “crítica”) en tres indicadores adicionales: el IPHE¹¹⁹, el IA y el IRH¹²⁰; a continuación, hay una columna en la que se recoge el número de indicadores críticos entre los cuatro evaluados y están organizadas en la tabla de mayor a menor número. En las columnas a la derecha del número de indicadores críticos se presentan la demanda hídrica reportada para cada uno de los sectores económicos considerados en el estudio. El orden de magnitud de la demanda de cada sector productivo permite tener una idea de cuales de ellos tienen mayor incidencia en la presión ejercida sobre el recurso hídrico, al tiempo que permite verificar el grado de competencia que se puede estar dando por el recurso hídrico; lo anterior puede dar arrojar luces sobre aquellas SZH en las que se deben privilegiar estrategias de reúso del agua entre los sectores que presentan las mayores demandas. Así mismo, en estas zonas se deben promover estrategias de uso eficiente del agua y elaborar estudios que permitan implementar medidas de uso conjunto de aguas superficiales, subterráneas y sistemas de recolección y almacenamiento de aguas lluvias.

¹¹⁹ Índice de Presión Hídrica al Ecosistema

¹²⁰ Índice de Retención y Regulación Hídrica

Por otro lado, las SZH que resultaron priorizadas por su nivel de criticidad en los indicadores examinados y que presentan una alta demanda minera o industrial son buenos candidatos para promover estrategias de recirculación en los procesos productivos.

De las 316 SZH de Colombia, 40 SZH presentaron alguna restricción por oferta-demanda (IUA) o por calidad (IACAL). Analizando exclusivamente estos dos indicadores, de las 40 SZH, 17 presentaron restricción únicamente por el índice IUA, 14 sólo por el IACAL y 9 por ambos indicadores. En todas estas SZH se identificaron actividades económicas o presencia de población, a excepción de la SZH 1703 (Isla de Roncador y Quitasueño). Este análisis proporciona una primera noción acerca de las SZH que deben ser priorizadas para implementar intervenciones relacionadas con la productividad del agua.

Para las 26 SZH que presentan restricciones asociadas a temas de oferta-demanda, adquiere especial relevancia la realización de estudios que permitan identificar y caracterizar los sistemas de acuíferos y establecer el potencial de aprovechamiento de aguas subterráneas; igualmente, se plantea evaluar en cuáles de estas zonas podrían implementarse sistemas de recolección y almacenamiento de agua lluvia o adoptar medidas para el uso eficiente del agua. Por otro lado, para las 23 SZH identificadas con restricciones por calidad del agua, los esfuerzos se deben enfocar en el diseño y construcción de los STAR y en la implementación de procesos de producción más limpia. En las 9 SZH que presentan criticidad en ambos indicadores se deben implementar los dos tipos de medidas.

Las SZH identificadas adquieren gran importancia en el análisis, no solo porque en ellas se encontró actividad en la mayoría de los sectores económicos considerados en el estudio, sino también porque en ellas se encuentran algunas de las ciudades más importantes en términos económicos y poblacionales.

Un alto porcentaje de la población del país se encuentra asentada en alguna SZH con restricciones hídricas bien sea por oferta o por calidad. Estas SZH generan un aporte considerable al PIB nacional, por lo que el crecimiento sostenible del país está expuesto a factores como la variabilidad hidrológica, el cambio climático y cambios en los usos del suelo, entre otros.

Tabla 54. Subzonas hidrográficas por IUA “muy alto” o “crítico” según ENA 2014

SZH	NOMBRE DE SZH	IUA	IPHE	IA	IRH	Número de indicadores críticos	Demanda hídrica (Millones de m ³ /año)					
							Pecuaria	Agrícola	Doméstica	Servicios	Minera	Industrial
2903	Canal del Dique margen derecho	X	X	X	X	4	15,86	434,72	18,82	0,65	-	0,02
2904	Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe (mi)	X	X	X	X	4	20,07	170,02	114,41	6,01	-	12,90
1206	Arroyos Directos al Caribe	X	X	X	X	4	15,90	517,27	69,91	7,38	0,03	2,05
2120	Río Bogotá	X	X		X	3	257,08	673,29	478,48	36,57	0,62	48,09
2909	Ciénaga Mallorquin	X		X	X	3	51,97	28,38	1,93	5,53	-	16,52
1506	Río Ranchería	X		X	X	3	5,35	480,51	15,15	0,49	54,95	0,01
2905	Canal del Dique margen izquierda	X		X	X	3	5,79	277,23	9,40	1,27	-	0,04
2607	Río Guachal (Bolo - Fraile y Párraga)	X	X			2	7,05	363,73	15,88	1,34	0,00	10,81
2630	Ríos Lilí, Melendez y Canaveralejo	X	X			2	35,12	6,15	197,38	5,83	0,24	3,82
2636	Río Paila	X	X			2	2,15	136,82	3,56	0,28	-	0,00
2125	Río Lagunilla y Otros Directos al Magdalena	X	X			2	9,18	307,29	10,14	0,55	1,14	0,00
2634	Ríos Cali	X	X			2	36,62	2,78	8,96	6,14	0,25	1,85
2637	Ríos Las Cañas - Los Micos y Obando	X	X			2	4,26	124,40	6,10	0,91	0,00	12,39
2108	Río Yaguará y Río Iquira	X			X	2	1,21	29,64	1,75	0,07	0,03	-
2118	Río Luisa y otros directos al Magdalena	X	X			2	5,21	323,39	9,12	0,64	0,10	0,04
2122	Río Opía	X		X		2	3,47	69,45	0,60	0,34	-	0,01
2622	Río Desbaratado	X	X			2	1,23	48,69	1,17	0,12	0,00	6,73
2609	Ríos Amaime y Cerrito	X	X			2	2,79	177,37	28,37	1,57	0,01	11,34
2631	Ríos Arroyohondo - Yumbo - Mulalo - Vijes - Yotoco - Mediacanoa y Piedras	X				1	1,63	52,66	3,24	1,28	0,02	60,56
2627	Río Piendamó	X				1	1,30	2,05	1,94	0,08	2,47	-
2106	Ríos directos Magdalena (md)	X				1	3,98	46,93	9,94	0,09	0,00	0,00
2109	Juncal y otros Ríos directos al Magdalena	X				1	3,08	65,00	0,50	0,10	0,21	-
2110	Río Neiva	X				1	3,47	132,76	4,79	0,06	-	0,00
2208	Bajo Saldaña	X				1	2,18	144,55	3,34	0,03	0,01	-
1703	Roncador y Quitasueño	X				1	-	-	-	-	-	-
1701	San Andrés	X				1	-	0,08	4,83	-	-	0,01

9.3 PRIORIZACIÓN DE SUBZONAS HIDROGRÁFICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES

En la Tabla 55 se presentan las subzonas hidrográficas que presentan un nivel de presión alta y muy alta para el índice IACAL y adicionalmente se presenta las diez SZH correspondientes a los municipios en los cuales el Gobierno Nacional a través del Viceministerio de Agua y Saneamiento en el año 2007 realizó una priorización en su Programa “Saneamiento de Vertimientos – SAVER” por ser los municipios del país que generan mayor carga de vertimientos contaminantes.

Analizando el IACAL se pueden encontrar 23 SZH en los cuales se tiene una presión alta o muy alta por cargas contaminantes que provienen de su cuenca aportante. De estas SZH, las del Río Bogotá, Alto Río Cauca, Río La Vieja, Río Chinchiná y Río Porce también fueron priorizadas en el Programa SAVER y se realizaron inversiones para la construcción e implementación de sistemas de tratamiento de agua residuales PTAR. Es de aclarar que en la SZH del Río La Vieja, al año 2014, no se habían realizado inversiones para cumplir con las metas de saneamiento. Las cinco SZH adicionales que contienen municipios priorizados en el programa SAVER no presentan un nivel de criticidad alto o muy alto en la calidad del agua de acuerdo con el índice IACAL.

Para las restantes 18 SZH que se presentan en la Tabla 55 y que no fueron priorizadas en el Programa SAVER, se recomienda su priorización para ser sujeto de inversión en programas de saneamiento de vertimientos debido a la baja capacidad que tienen sus cuerpos de agua superficial para asimilar las cargas contaminantes provenientes de los diferentes sectores económicos según lo establecido por el índice IACAL.

Tabla 55. Subzonas hidrográficas priorizadas para implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales por el Programa SAVER o por su nivel de criticidad de acuerdo al índice IACAL

Código	Subzona hidrográfica	IACAL	SAVER
2120	Río Bogotá	X	Sí
2601	Alto Río Cauca	X	Sí
2612	Río La Vieja	X	Sí
2615	Río Chinchiná	X	Sí
2701	Río Porce	X	Sí
1608	Río del Suroeste y directos Río de Oro		Sí
2402	Río Fonce		Sí
2403	Río Chicamocha		Sí
2613	Río Otún y otros directos al Cauca		Sí
5204	Río Juanambú		Sí
1206	Arroyos Directos al Caribe	X	
1501	Río Piedras - Río Manzanares	X	
1505	Río Camarones y otros directos Caribe	X	
1507	Directos Caribe – Arroyo Sharimahana Alta Guajira	X	
1508	Río Carraipia - Paraguachón, Directos al Golfo Maracaibo	X	
1601	Río Pamplonita	X	

Código	Subzona hidrográfica	IACAL	SAVER
1701	San Andrés	X	
2102	Río Timaná y otros directos al Magdalena	X	
2111	Río Fortalecillas y otros	X	
2121	Río Coello	X	
2609	Ríos Amaime y Cerrito	X	
2610	Ríos Tuluá y Morales	X	
2630	Ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo	X	
2631	Ríos Arroyohondo - Yumbo - Mulaló - Vijes - Yotoco - Mediacanoa y Piedras	X	
2633	Ríos Guadalajara y San Pedro	X	
2903	Canal del Dique margen derecho	X	
2904	Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe (mi)	X	
2909	Ciénaga Mallorquín	X	

9.4 INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS SECTORES ECONÓMICOS

Cada cierto tiempo, el país remite a la Convención Marco de Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC) las Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático elaboradas por el IDEAM, en las que se reportan los avances del país en cuanto al análisis de vulnerabilidad, medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, inventario de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y las acciones de educación, formación y sensibilización sobre el tema al público en general (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015). El último de estos informes presentado por el país ante la CMNUCC es la Tercera Comunicación Nacional de Colombia a La Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b).

9.4.1 NUEVOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA COLOMBIA 2011-2100. NIVEL NACIONAL-REGIONAL. HERRAMIENTA PARA LA TOMA DE DECISIONES

Las dos principales variables que marcan las tendencias de cambio climático en un lugar a largo plazo son la precipitación y la temperatura, las cuales pueden sufrir alteraciones por fenómenos naturales o antrópicos (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b), y por lo general tienen una gran incidencia sobre otras variables del ciclo hidrológico como la evapotranspiración, la humedad del aire y del suelo, el caudal en los ríos, entre otras. En Colombia, el seguimiento y monitoreo a estas variables es realizada actualmente por el IDEAM, que cuenta con una red nacional de 2.652 estaciones hidrometeorológicas activas y 148 de calidad de agua.

9.4.2 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO ELABORADOS POR EL IDEAM PARA COLOMBIA

Los escenarios de cambio climático planteados para Colombia son proyecciones del posible estado futuro del clima, las cuales se construyen empleando metodologías basadas en modelos dinámicos y estadísticos, bajo los lineamientos propuestos por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), en su Quinto Informe de Evaluación (AR5) (IPCC, 2013). En estas proyecciones se generan los

escenarios de la posible variación de estas variables para fin de siglo, es decir, en el período comprendido entre los años 2011 y 2100 (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015).

Las metodologías mencionadas, se basan en la descripción de los Caminos Representativos de Concentración de Emisiones (RCP) (2,6; 4,5; 6,0 y 8,5), los cuales se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que podrá oscilar entre 2,6 y 8,5 vatios por metro cuadrado (W/m^2), cada uno de los cuales contiene implícitamente una serie de consideraciones socioeconómicas, tecnológicas y biofísicas diferentes (Tabla 56). Para obtener resultados a partir de dichos modelos globales en el contexto nacional y regional, el IDEAM estudió el desempeño de diversos métodos de ensamble, adoptando finalmente el método “Ensamble Promedio de Fiabilidad Conjunta”. Además, se realizaron ensambles multimodelo y multiescenario que permitieron promediar las respuestas obtenidas con los diferentes RCP (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b).

Tabla 56. Caminos de Forzamiento Radiativo (FR) seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100

Escenario	Forzamiento Radiativo (W/m^2)	CO _{2eq} atmosférico (ppm)	Anomalia de temperatura	Trayectoria	Equivalente para escenarios SRES (AR4)
RCP8.5	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento	SRES A1F1
RCP6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100	SRES B2
RCP4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100	SRES B1
RCP2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina	Ninguno

Fuente: (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015)

El IDEAM ha analizado el comportamiento de la precipitación y la temperatura en el territorio colombiano a partir de su medición sistemática, para tener una línea base adecuada de la variabilidad a escalas de tiempo estacional, anual e interanual. Se han calculado las variaciones por departamento de estas variables (Tabla 57 a Tabla 61), para los tres períodos de 30 años que usualmente se utilizan en este tipo de proyecciones (2011 - 2040; 2041 - 2070 y 2071 - 2100), lo que constituye una valiosa información para la toma de decisiones en la planificación ambiental y territorial del país. Los resultados del escenario producto del ensamble indican que el aumento esperado en la temperatura, así como el comportamiento de la precipitación no serán homogéneos en todas las regiones del país (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b).

Tabla 57. Resultados proyecciones de cambio climático para la región de la Amazonia en los tres períodos de proyección de 30 años (2011 - 2040; 2041 - 2070 y 2071 - 2100)

DEPARTAMENTO	Cambio de Temperatura (°C) respecto al período de referencia (1976-2005)			Cambio de Precipitación (%) respecto al período de referencia (1976 - 2005)		
	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)
Amazonas	0,7	1,5	2,4	-14,8	-12,5	-14,0
Caquetá	0,8	1,5	2,2	-19,0	-19,3	-17,2
Guainía	0,9	1,7	2,7	-5,5	-9,7	-9,3
Guaviare	0,9	1,7	2,5	-6,7	-9,4	-5,1

DEPARTAMENTO	Cambio de Temperatura (°C) respecto al período de referencia (1976-2005)			Cambio de Precipitación (%) respecto al período de referencia (1976 - 2005)		
	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)
Putumayo	0,8	1,5	2,2	4,5	6,7	6,7
Vaupés	1,0	1,9	2,6	-20,5	-22,7	-23,3
Promedio	0,9	1,6	2,4	-10,3	-11,1	-10,4

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b)

Tabla 58. Resultados proyecciones de cambio climático para la región de la Andina en los tres períodos de proyección de 30 años (2011 - 2040; 2041 - 2070 y 2071 - 2100)

DEPARTAMENTO	Cambio de Temperatura (°C) respecto al período de referencia (1976-2005)			Cambio de Precipitación (%) respecto al período de referencia (1976 - 2005)		
	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)
Antioquia	0,8	1,4	2,2	4,9	6,9	9,3
Bogotá DC	0,8	1,4	2,2	6,6	9,5	8,3
Boyacá	0,8	1,6	2,4	5,8	3,7	3,2
Caldas	0,9	1,6	2,4	20,2	22,6	28,1
Cundinamarca	0,8	1,5	2,3	8,0	9,0	8,2
Huila	0,8	1,4	2,1	16,5	17,7	17,2
Norte de Santander	0,9	1,7	2,6	1,0	0,2	-0,4
Quindío	0,8	1,5	2,3	6,3	12,2	24,3
Risaralda	0,8	1,5	2,4	18,3	20,3	28,4
Santander	0,9	1,7	2,5	0,5	-1,3	-1,2
Tolima	0,9	1,6	2,3	10,5	13,1	17,2
Promedio	0,8	1,5	2,3	9,0	10,4	13,0

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b).

Tabla 59. Resultados proyecciones de cambio climático para la región Caribe en los tres períodos de proyección de 30 años (2011 - 2040; 2041 - 2070 y 2071 - 2100)

DEPARTAMENTO	Cambio de Temperatura (°C) respecto al período de referencia (1976-2005)			Cambio de Precipitación (%) respecto al período de referencia (1976 - 2005)		
	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)
Atlántico	1,1	1,6	2,2	-7,4	-9,5	-11,3
Bolívar	0,9	1,6	2,2	-15,1	-15,2	-17,1
Cesar	1,1	1,9	2,5	-15,3	-16,2	-19,8
Córdoba	0,9	1,6	2,2	1,6	1,9	-1,4
La Guajira	0,9	1,6	2,3	-14,5	-16,6	-20,0
Magdalena	1,0	1,7	2,4	-18,7	-20,8	-23,2
San Andrés y Providencia	0,8	1,4	2,0	-30,2	-32,8	-33,0
Sucre	0,9	1,6	2,1	-11,3	-13,4	-16,2
Promedio	1,0	1,6	2,2	-13,9	-15,3	-17,8

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b).

Tabla 60. Resultados proyecciones de cambio climático para la región de la Orinoquia en los tres períodos de proyección de 30 años (2011 - 2040; 2041 - 2070 y 2071 - 2100)

DEPARTAMENTO	Cambio de Temperatura (°C) respecto al período de referencia (1976-2005)			Cambio de Precipitación (%) respecto al período de referencia (1976 - 2005)		
	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)
Arauca	0,9	1,8	2,6	1,1	2,2	2,7
Casanare	0,9	1,7	2,4	-2,8	-2,1	-4,1
Meta	0,9	1,7	2,4	-7,5	-5,7	-3,9
Vichada	0,9	1,8	2,6	-0,6	-1,9	-2,4
Promedio	0,9	1,8	2,5	-2,4	-1,9	-1,9

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b).

Tabla 61. Resultados proyecciones de cambio climático para la región de la Pacífico en los tres períodos de proyección de 30 años (2011 - 2040; 2041 - 2070 y 2071 - 2100)

DEPARTAMENTO	Cambio de Temperatura (°C) respecto al período de referencia (1976-2005)			Cambio de Precipitación (%) respecto al período de referencia (1976 - 2005)		
	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)	(2011-2040)	(2041-2070)	(2071-2100)
Cauca	0,7	1,4	2,1	16,2	17,2	18,4
Chocó	0,8	1,5	2,3	-5,2	-4,0	-2,6
Nariño	0,7	1,4	2,1	13,7	13,4	12,0
Valle del Cauca	0,9	1,6	2,4	6,6	6,1	6,1
Promedio	0,8	1,5	2,2	7,8	8,2	8,5

Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b).

Los mayores aumentos de temperatura se presentan en la Orinoquia, especialmente en los departamentos de Arauca y Vichada, y en la Amazonia, en los departamentos de Guainía y Vaupés. En contraste, los menores aumentos en esta variable se proyectan en la región Pacífica, aun así, superando los 2,2 grados para el período de 2070-2100, mientras que en las regiones Caribe y Andina se presentarán valores intermedios de temperatura en relación a las demás regiones. No obstante, para el periodo 2011-2040, en la región Caribe se presentan aumentos mayores que en las demás regiones, especialmente en los departamentos Atlántico y Cesar. En la región Andina, los valores más altos se esperan en los Santanderes, Boyacá, Caldas y Tolima.

En la región Caribe se presentarán las mayores reducciones medias de la precipitación, con valores medios entre el 13,9% (2011-2040) y el 17,8% (2070-2100). No obstante, en Las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina las reducciones superarán el 30% para todos los períodos, lo que indica una alta criticidad, inclusive en el corto plazo. También serán importantes las reducciones en Magdalena, Cesar, Bolívar y Sucre, y cercanas al 10% en el Atlántico. En Córdoba los cambios serán menores, con ligeros incrementos en los dos primeros períodos y un leve decremento en el tercero.

En la región de la Amazonia se prevén reducciones medias de la precipitación cercanas al 10%, aunque con más del doble de este valor en el Vaupés, casi el doble en el Caquetá y alrededor del 15% en el Amazonas; en el Putumayo se presentarán incrementos menores al 7%. En la región Andina se presentarán incrementos medios de precipitación del orden del 9,0% (2011-2014) al 13% (2017-2100), aunque se espera tener más del doble de estos valores en Caldas y Risaralda, casi el doble en el Huila y valores mayores a la media en el Tolima. En Quindío también se presentarán valores mayores a la media en los dos últimos dos períodos y la mayor tendencia de incremento del país. En contraste con lo

anterior, en los Santanderes se esperan incrementos muy pequeños en el primer período y un decremento muy leve en el último.

En la Orinoquia se esperan reducciones de la precipitación del orden del 2%, siendo las mayores reducciones en el Meta en el primer período superando el 7%, y en Casanare en el último período, cercanas al 4%. En contraste con lo anterior, se proyecta un ligero aumento de las precipitaciones del orden del 2% en Arauca. Mientras que en el Pacífico se espera un incremento medio en las precipitaciones del orden del 8%, con más del doble de estos valores en el Cauca y valores mayores al 12% en Nariño y del orden del 6% en el Valle del Cauca. En contraste con lo anterior, en el Chocó se esperan reducciones del orden del 5% en el primer período e inferiores al 3% en el tercer período.

Como consecuencia del aumento en la temperatura a escala global se espera que ocurra un ascenso del nivel del mar que generará erosión y retrocesos considerables en la línea de costa afectando a las poblaciones asentadas en las zonas costeras. Así mismo, se presentará una pérdida significativa de las áreas glaciares en los nevados y retroceso de los páramos hacia zonas más altas con la consiguiente pérdida en la capacidad de regulación de la oferta hídrica en las cuencas que tienen sus cabeceras en estas zonas, seguramente con un gran impacto sobre muchos de los acueductos abastecedores, los cuales se surten de fuentes superficiales que nacen en estas zonas; finalmente, se espera una mayor incidencia potencial de fenómenos climáticos extremos (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015).

El aumento en la temperatura en conjunto con los cambios en el uso del suelo pueden acentuar los procesos de desertificación disminuyendo la productividad de los suelos agrícolas y de zonas forestales, causando la pérdida de numerosas fuentes superficiales de agua (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015). Por otro lado, las zonas donde se presenten incrementos significativos de la precipitación con cambios importantes en el uso del suelo, pueden sufrir mayor probabilidad de deslizamientos, movimientos en masa y eventos torrenciales, causando afectaciones considerables a la infraestructura física del país, pudiendo afectar en muchos casos las bocatomas de acueductos veredales en zonas montañosas y ocasionar inundaciones más severas en las zonas llanas (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015).

Los efectos combinados del cambio climático y la variabilidad climática a escala interanual debida al fenómeno macroclimático ENSO (en sus fase cálida, El Niño y fría, La Niña), pueden llevar a que sus efectos hidrológicos derivados sean aún más intensos que en la actualidad, generando mayores impactos en los territorios y en los diferentes sectores económicos. En efecto, se espera que los años El Niño sean más críticos en las regiones donde las proyecciones de cambio climático sugieran que ocurrirá un aumento importante de la temperatura y una reducción significativa de la precipitación, ya que se podrá acentuar el efecto combinado de ambas variables. En contraste, los años La Niña podrán ser especialmente severos en cuanto a la ocurrencia de inundaciones en las regiones donde se espere un aumento significativo de la precipitación a largo plazo como consecuencia del cambio climático.

Esto implica que las medidas para hacer frente a los posibles fenómenos extremos deben ser acordes a lo que se puede esperar en cada región del territorio nacional. Por ejemplo, para el sector agrícola, se requiere anticipar cuales cultivos serán más aptos en los diferentes territorios de acuerdo a los cambios esperados como una medida de planificación para garantizar la seguridad alimentaria y la competitividad regional futura (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015). Todos los sectores en general deberán entender su relación con el entorno natural y los cambios esperados en el mismo que condicionarán el acceso al agua y a otros recursos, la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad para tener unos territorios más resilientes al clima futuro (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015).

9.4.3 EFECTOS ESPERADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS SUBZONAS HIDROGRÁFICAS DEL PAÍS EN LAS QUE SE HA ESTABLECIDO ALGÚN TIPO DE PRESIÓN EN RELACIÓN CON EL RECURSO HÍDRICO

El análisis de los impactos del cambio climático en relación con el uso del agua de los sectores económicos se realizó a escala de subzona hidrográfica, considerando las 40 SZH que tienen identificado algún tipo de presión por oferta o calidad hídrica, de acuerdo a la evaluación realizada de los índices IUA e IACAL (Tabla 54 y Tabla 55).

En la Tabla 62 se presenta una descripción general de la situación actual en cada una de estas SZH, en relación con las demandas anuales estimadas para los sectores económicos y los efectos esperados a futuro de acuerdo a los escenarios de cambio climático proyectados para el país en la Tercera Comunicación Nacional (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017b). En este análisis también se tuvo en consideración el nivel de riesgo por recurso hídrico estimado para cada uno de los Departamentos donde están localizadas las diferentes SZH priorizadas, en el estudio *“Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo por Cambio Climático en Colombia”* (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017a), el cual hace parte de las consultorías realizadas en el marco de la Tercera Comunicación Nacional. En ese estudio se definieron 5 categorías de riesgo asociadas al recurso hídrico. Todos los departamentos donde se concentran las SZH que se han priorizado en el presente estudio tienen categoría de riesgo “alto” o “muy alto”

Tabla 62. Efectos esperados del cambio climático para cada una de las SZH que presentan algún tipo de presión en relación con el recurso hídrico de acuerdo con los indicadores empleados. La última columna hace referencia al nivel de riesgo asociado al recurso hídrico, de acuerdo a la Tercera Comunicación Nacional (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA, 2017a)

SZH	NOMBRE SZH	DEPARTAMENTOS	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	EFFECTOS ESPERADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	RIESGO RH
2701	Río Porce	ANTIOQUIA	Presión moderada en la calidad del recurso hídrico por alta demanda pecuaria, doméstica + servicios, industrial y minera.	En Antioquia se darán incrementos de temperatura de 0,8 grados (2011-2040) y de 2,2 grados (2071-2100) y de precipitación del orden del 5% en el primer período y casi el 10% en el último. Esto podría ocasionar mayor o menor escorrentía en función del incremento en la ETP, en relación al incremento en la precipitación. La mayor precipitación podría generar eventos extremos más intensos y mayor erosión. La oferta hídrica se podría favorecer por estas condiciones con efectos positivos sobre la generación de hidroenergía y la dilución de contaminantes, pero también se pueden incrementar las cargas de sedimentos por efectos de la erosión.	ALTO
2909	Ciénaga Mallorquín	ATLÁNTICO	Fuerte presión por el uso y la calidad del recurso hídrico por alta demanda por uso pecuario, agrícola e industrial.	En el Atlántico se esperan los mayores incrementos de temperatura del país en el período 2011-2040 con 1,1 grados y el doble a final de siglo, y reducciones en la precipitación que oscilan entre el 7,5% en ese mismo período y del 11,3% para finales de siglo. Lo anterior se traduce en una mayor ETP en relación con la precipitación, llevando a su vez a una mayor aridez, sequías más prolongadas y reducción de los recursos hídricos superficiales con afectaciones importantes sobre el sector pecuario y agrícola.	MUY ALTO
1206	Arroyos Directos al Caribe	ATLÁNTICO, BOLÍVAR	Fuerte presión por el uso y la calidad del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda agrícola, doméstica + servicios y pecuaria en menor medida.	En el Atlántico se esperan los mayores incrementos de temperatura del país en el período 2011-2040 con 1,1 grados y 2,2 a final de siglo, y reducciones en la precipitación que oscilan entre el 7,5% en ese mismo período y del 11,3% para finales de siglo. En Bolívar el aumento de temperatura será menor que en Atlántico en el período 2011-2040 (0,9 grados) e igual que en Atlántico al final de siglo, pero la precipitación se va a reducir hasta en un 17,1%. Lo anterior se traduce en una mayor ETP y menor precipitación, llevando necesariamente a una reducción en la oferta hídrica superficial, una mayor aridez, sequías más severas y prolongadas y reducción significativas de los recursos hídricos superficiales en general con afectaciones importantes sobre todos los sectores, incluido el turismo por el mayor déficit hídrico, y la consiguiente mayor presión sobre los ecosistemas.	MUY ALTO
2903	Canal del Dique margen derecho	ATLÁNTICO, BOLÍVAR	Fuerte presión por el uso y la calidad del Recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda agrícola, doméstica y pecuaria.	La mayor parte de esta SZH está en el Atlántico, donde se esperan los mayores incrementos de temperatura del país en el período 2011-2040 con 1,1 grados y 2,2 a final de siglo, y reducciones en la precipitación que oscilan entre el 7,5% en ese mismo período y del 11,3% para finales de siglo. Lo anterior se traduce en una mayor ETP y menor precipitación, llevando necesariamente a una reducción en la oferta hídrica superficial, una mayor aridez, sequías más severas y prolongadas y reducción significativas de los	MUY ALTO
2904	Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe (mi)	ATLÁNTICO, MAGDALENA	Fuerte presión por el uso y la calidad del Recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda en todos los sectores, excepto el minero.		MUY ALTO

SZH	NOMBRE SZH	DEPARTAMENTOS	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	EFFECTOS ESPERADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	RIESGO RH
				recursos hídricos superficiales en general con afectaciones importantes sobre todos los sectores, incluido el turismo por el mayor déficit hídrico, y la consiguiente mayor presión sobre los ecosistemas.	
2905	Canal del Dique margen izquierda	BOLÍVAR, SUCRE	Presión moderada por el uso del recurso hídrico por alta demanda agrícola, y en menor medida, doméstica y pecuaria.	En los departamentos de Bolívar y Sucre el aumento de temperatura será de 0,9 grados en el período 2011-2040 y de 2,2 grados al final de siglo, y la precipitación se va a reducir hasta en un 17,1% y 16,2% a final de siglo, respectivamente. Lo anterior se traduce en una mayor ETP en relación con la precipitación, llevando a su vez a una mayor aridez, sequías más prolongadas y reducción de los recursos hídricos superficiales con afectaciones importantes sobre todos los sectores, incluido el turismo por el mayor déficit hídrico.	MUY ALTO
2615	Río Chinchiná	CALDAS	Alta presión sobre la calidad del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por demanda doméstica y pecuaria.	En el departamento de Caldas se proyectan incrementos de temperatura de 0,9 grados (2011-2040) y de 2,4 grados (2071-2100) y de precipitación de 20,2% en el primer período y del 28,1% para final de siglo. Probablemente, el incremento en la lluvia será mucho mayor al de la ETP por el efecto del aumento de temperatura lo que generará mayores escorrentías medias. También es de esperar eventos extremos máximos más intensos y mucho mayor erosión en las cuencas, especialmente en las laderas con altas pendientes, lo que implica la necesidad de hacer un manejo adecuado del uso del suelo. Se puede esperar mayor capacidad de dilución de contaminantes, pero también mayor concentración de sedimentos y mayores alteraciones sobre los ecosistemas relacionadas con el aumento de las temperaturas y un régimen de precipitación más intenso.	ALTO
2601	Alto Río Cauca	CAUCA	Alta presión sobre la calidad del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por demanda doméstica y pecuaria.	En el departamento del Cauca se proyectan incrementos de temperatura de 0,7 grados (2011-2040) y de 2,1 grados (2071-2100) y de la precipitación del 16,2% y 18,4% en los mismos períodos, respectivamente. Probablemente, el incremento en la lluvia será mucho mayor al de la ETP por el efecto del aumento de temperatura lo que generará mayores escorrentías medias. También es de esperar eventos extremos máximos más intensos y mayores tasas de erosión en las cuencas, especialmente en las laderas con altas pendientes, lo que implica la necesidad de hacer un manejo adecuado del uso del suelo. Se puede esperar mayor capacidad de dilución de contaminantes, pero también mayor concentración de sedimentos y mayores alteraciones sobre los ecosistemas y la biodiversidad relacionadas con el aumento de las temperaturas y un régimen de precipitación más intenso.	ALTO
2627	Río Piendamó	CAUCA	Presión moderada por uso del recurso hídrico.	En el departamento del Cauca se proyectan incrementos de temperatura de 0,9 grados (2011-2040) y de 2,4 grados (2071-2100) y de la precipitación, del orden de 6,6% y 6,1% en los mismos períodos, respectivamente. El incremento de la lluvia puede ser del mismo orden de magnitud al de la ETP	ALTO
2622	Río Desbaratado	CAUCA, VALLE DEL CAUCA	Alta presión por el uso y en la calidad del recurso hídrico por alta demanda agrícola, principalmente.	En el Valle del Cauca se proyectan incrementos de las temperaturas del orden de 0,9 grados (2011-2040) y de 2,4 grados (2071-2100) y de la precipitación, del orden de 6,6% y 6,1% en los mismos períodos, respectivamente. El incremento de la lluvia puede ser del mismo orden de magnitud al de la ETP	ALTO

SZH	NOMBRE SZH	DEPARTAMENTOS	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	EFFECTOS ESPERADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	RIESGO RH
				por el efecto del aumento de temperatura, por lo que es difícil establecer los efectos sobre la oferta hídrica sin estudios más detallados. No obstante, es de esperar la ocurrencia de eventos extremos máximos más intensos y mayores tasas de erosión en las cuencas, especialmente en las laderas con altas pendientes, lo que implica la necesidad de hacer un manejo adecuado del uso del suelo. También puede haber alteraciones sobre los páramos, los ecosistemas y la biodiversidad, y reducción de las áreas nivales por el aumento de las temperaturas y un régimen de precipitación más intenso. El aumento en la precipitación también puede generar mayor incidencia de plagas en la agricultura.	
2120	Río Bogotá	CUNDINAMARCA	Fuerte presión por el uso y la calidad del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda en todos los sectores, especialmente agrícola, doméstico + servicios y pecuario, excepto el minero.	En Cundinamarca se esperan aumento de temperatura de 0,8 grados (2011-2040) a 2,3 grados (2071-2100) y de la precipitación que puede alcanzar el 9% (2041-2070). Se puede presentar estrés térmico sobre los páramos y la biodiversidad y migración altitudinal de los mismos por el incremento en la temperatura con posibles efectos adversos sobre la capacidad de regulación hídrica. El aumento en la precipitación puede generar aumento de plagas en la agricultura. La mayor precipitación puede generar mayor erosión y cargas de sedimentos en las cuencas y eventos extremos máximos más intensos que pueden aumentar las inundaciones en las zonas bajas.	MUY ALTO
2111	Río Fortalecillas y otros	HUILA	Presión moderada en la calidad del recurso hídrico por alta demanda agrícola, pecuaria y doméstica.	En el Huila se darán incrementos de temperatura de 0,8 grados (2011-2040) y de 2,1 grados (2071-2100) y de precipitación del orden del 16,5 % en el primer período y 17,2 % en el último. Esto podría ocasionar un aumento en la oferta hídrica en función del incremento en la ETP, en relación al incremento en la precipitación, que será considerable, reduciendo presión sobre el uso del agua. No obstante, hay una alta probabilidad de que se aumente la magnitud de los eventos extremos máximos con mayores afectaciones por inundaciones. Otros efectos adversos se pueden dar en el sector agrícola por la mayor incidencia de plagas y enfermedades asociadas al incremento en la precipitación, especialmente sobre los monocultivos en plantaciones extensivas.	ALTO
2110	Río Neiva	HUILA	Presión moderada por uso del recurso hídrico por alta demanda agrícola, principalmente.		ALTO
2109	Juncal y otros Ríos directos al Magdalena	HUILA	Presión moderada por uso del recurso hídrico por alta demanda agrícola, principalmente.		ALTO
2106	Ríos directos Magdalena (md)	HUILA	Presión moderada por uso del recurso hídrico por demanda agrícola y doméstica, principalmente.		ALTO
2108	Río Yaguará y Río Iquira	HUILA	Presión moderada por uso del recurso hídrico por demanda agrícola, principalmente.		ALTO
2102	Río Timaná y otros directos al Magdalena	HUILA	Presión moderada sobre la calidad del recurso hídrico por demanda agrícola, principalmente.		ALTO

SZH	NOMBRE SZH	DEPARTAMENTOS	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	EFFECTOS ESPERADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	RIESGO RH
1506	Río Ranchería	LA GUAJIRA	Presión moderada por el uso del recurso hídrico por alta demanda agrícola y minera, y en menor medida, doméstica y pecuaria.	En La Guajira el aumento de temperatura será de 0,9 grados (2011-2040) y de 2,3 grados (2071-2100), y se presentará una reducción en la precipitación de 14,5% en el primer período y 20% a final de siglo. Lo anterior es especialmente crítico en este departamento que en situación actual ya tiene una temperatura media muy alta y un régimen de bajas precipitaciones. Esto se traduce en una ETP mucho mayor que conjugada con la menor precipitación, llevará necesariamente a una reducción en la oferta hídrica superficial, mayor aridez, sequías más severas y prolongadas y reducción significativa de los recursos hídricos superficiales, en general con afectaciones importantes sobre todos los sectores, especialmente el agropecuario y el turismo por el mayor déficit hídrico, e igualmente, una presión mucho mayor sobre los ecosistemas, incrementando las enfermedades y agravando los problemas de seguridad alimentaria de las comunidades allí asentadas.	MUY ALTO
1507	Directos Caribe - Ay.Sharimahana Alta Guajira	LA GUAJIRA	Presión moderada sobre la calidad del recurso hídrico por demanda agrícola, doméstica y minera.		MUY ALTO
1505	Río Camarones y otros directos Caribe	LA GUAJIRA	Presión moderada sobre la calidad del recurso hídrico por demanda agrícola, principalmente.		MUY ALTO
1508	Río Carraipia - Paraguachón, Directos al Golfo Maracaibo	LA GUAJIRA	Presión moderada sobre la calidad del recurso hídrico por demanda agrícola y doméstico.		MUY ALTO
1501	Río Piedras - Río Manzanares	MAGDALENA	Presión moderada sobre la calidad del recurso hídrico por alta demanda agrícola, doméstica y pecuaria en menor medida.	En Magdalena el aumento de temperatura será 1,0 grado en el período 2011-2040 y 2,4 grados al final de siglo, en donde se esperan reducciones en la precipitación hasta del 23,2%.Lo anterior se traduce en una mayor ETP y menor precipitación, llevando necesariamente a una reducción en la oferta hídrica superficial, una mayor aridez, sequías más severas y prolongadas y reducción significativa de los recursos hídricos superficiales en general, con afectaciones importantes sobre todos los sectores, incluido el turismo por el mayor déficit hídrico, una menor capacidad de dilución de contaminantes y mayor presión sobre los ecosistemas y las comunidades.	MUY ALTO
1601	Río Pamplonita	N. SANTANDER DE	Presión moderada en la calidad del recurso hídrico por alta demanda doméstica, agrícola y pecuaria.	En el departamento de Norte de Santander se darán incrementos de temperatura de 0,9 grados (2011-2040) y de 2,6 grados (2071-2100) y las variaciones de precipitación serán inferiores al 1%. Esto puede implicar la ocurrencia de períodos de sequía más intensos y prolongados y una reducción moderada de la oferta hídrica debida a las mayores tasas de la ETP, generando una mayor presión sobre la calidad del recurso hídrico.	MUY ALTO
2612	Río La Vieja	QUINDÍO, RISARALDA, VALLE DEL CAUCA	Presión alta en la calidad del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda agrícola, doméstica + servicios, pecuaria e industrial en menor medida.	El aumento de la temperatura que se proyecta en estos tres departamentos será muy similar, con incrementos de entre 0,8 y 0,9 grados (2011-2040) y de 2,3 a 2,4 grados (2071-2100). Las precipitaciones si tendrán variaciones importantes, con incrementos cercanos al 6% en el Valle del Cauca y Quindío, del 18% en Risaralda (2011-2040) y del 6,1%, 24,3y 28,4% a final de siglo respectivamente. Aparentemente, el incremento en la lluvia será mucho mayor al de la ETP por el efecto del aumento de temperatura lo que muy probablemente generará una mayor oferta hídrica. También es de esperar eventos extremos máximos más intensos, con mayor incidencia de inundaciones y unas mayores tasas de erosión en la cuenca, especialmente	ALTO

SZH	NOMBRE SZH	DEPARTAMENTOS	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	EFFECTOS ESPERADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	RIESGO RH
				en las laderas con mayores pendientes, lo que implica la necesidad de hacer un manejo adecuado del uso del suelo. La mayor oferta hídrica puede tener efectos positivos de dilución de contaminantes, pero también mayores cargas de sedimentos. Se pueden esperar mayores alteraciones sobre los ecosistemas y la biodiversidad relacionadas con el aumento de las temperaturas y un régimen de precipitación mucho más intenso.	
1701	San Andrés	SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA	Presión moderada sobre la calidad del recurso hídrico por demanda doméstica.	En el archipiélago de San Andrés y Providencia se espera el menor incremento de temperatura del país con 0,8 grados en 2011-2040 y 2,0 grados para el final de siglo, pero también se presentará la mayor reducción de precipitación en todo el país, que será de 30,2 % en el primer período y del 33% para finales de siglo. Lo anterior se traduce en una mayor ETP que conjugada con la reducción en la precipitación dará como resultado una menor oferta hídrica, llevando a su vez a una mayor aridez, sequías más prolongadas y reducción de los recursos hídricos superficiales y mayor presión sobre el uso y la calidad de los mismos y sobre los ecosistemas terrestres, con afectaciones importantes sobre la población y el sector turístico.	ALTO
1703	Roncador y Quitasueño	SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA	Presión moderada por uso del recurso hídrico.		ALTO
2118	Río Luisa y otros directos al Magdalena	TOLIMA	Alta presión por el uso del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda agrícola, doméstica y pecuaria en menor medida.	En el Tolima se darán incrementos de temperatura de 0,9 grados (2011-2040) y de 2,3 grados (2071-2100) y de precipitación del orden de 10,5 % en el primer período y 17,2 % a final de siglo. Esto podría ocasionar un aumento en la oferta hídrica en condiciones medias en función del incremento en la ETP, en relación al incremento en la precipitación, que será considerable. No obstante, la mayor presión por el uso del agua se da en las épocas de sequía cuya magnitud se puede incrementar por el efecto de la temperatura. En épocas húmedas se podrá tener mayor dilución de contaminantes, no así en la época seca. Es muy probable que aumente la magnitud de los eventos extremos máximos con mayores afectaciones por inundaciones y mayores tasas de erosión en zonas de altas pendientes. Otros efectos adversos se pueden dar en el sector agrícola por la mayor incidencia de plagas y enfermedades asociadas al incremento en la precipitación, especialmente sobre los monocultivos en plantaciones extensivas.	ALTO
2125	Río Lagunilla y Otros Directos al Magdalena	TOLIMA	Alta presión por el uso del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda agrícola, doméstica y pecuaria en menor medida.		ALTO
2208	Bajo Saldaña	TOLIMA	Presión moderada por uso del recurso hídrico por alta demanda agrícola, principalmente.		ALTO
2121	Río Coello	TOLIMA	Presión moderada sobre la calidad del recurso hídrico por alta demanda agrícola y pecuaria, principalmente.		ALTO
2122	Río Opía	TOLIMA	Presión moderada por uso del recurso hídrico por alta demanda agrícola, principalmente.		ALTO
2607	Río Guachal (Bolo - Fraile y Párraga)	VALLE DEL CAUCA	Fuerte presión por el uso del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda agrícola, doméstica, industrial y pecuaria.	En el Valle del Cauca se darán incrementos de temperatura de 0,9 grados (2011-2040) y de 2,4 grados (2071-2100) y de precipitación del orden de 6,6% en el primer período y 6,1% a final de siglo. Esto podría ocasionar un cambio moderado en la oferta hídrica en condiciones medias en función del incremento en la ETP, en relación al incremento en la precipitación. No	ALTO

SZH	NOMBRE SZH	DEPARTAMENTOS	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	EFFECTOS ESPERADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	RIESGO RH
2630	Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo	VALLE CAUCA DEL	Fuerte presión por el uso y la calidad del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda por uso doméstico y pecuario principalmente, aunque con algo de actividad agrícola e industrial	obstante, la mayor presión por el uso del agua se da en las épocas de sequía cuya magnitud se puede incrementar por el aumento de la temperatura. La presión sobre la calidad del agua puede ser mayor en las épocas secas. Los eventos extremos máximos pueden ser más intensos y se producirán mayores tasas de erosión en zonas de altas pendientes. Otros efectos adversos se pueden dar en el sector agrícola por la mayor incidencia de plagas y enfermedades asociadas al incremento en la precipitación, especialmente sobre los monocultivos en plantaciones extensivas y mayor presión sobre los ecosistemas asociada fundamentalmente al incremento de temperatura.	ALTO
2609	Ríos Amaime y Cerrito	VALLE CAUCA DEL	Alta presión sobre la calidad del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda agrícola, doméstica e industrial.		ALTO
2637	Ríos Las Cañas - Los Micos y Obando	VALLE CAUCA DEL	Alta presión por uso del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda agrícola, principalmente (doméstica e industrial en menor medida).		ALTO
2636	Río Paila	VALLE CAUCA DEL	Fuerte presión por el uso del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda por uso agrícola, principalmente.		ALTO
2631	Ríos Arroyohondo - Yumbo - Mulaló - Vijes - Yotoco - Mediacanoa y Piedras	VALLE CAUCA DEL	Alta presión por el uso y en la calidad del recurso hídrico por alta demanda industrial y agrícola, principalmente.		ALTO
2610	Ríos Tuluá y Morales	VALLE CAUCA DEL	Presión moderada sobre la calidad del recurso hídrico por alta demanda agrícola, pecuaria, doméstica e industrial.		ALTO
2633	Ríos Guadalajara y San Pedro	VALLE CAUCA DEL	Alta presión sobre la calidad del recurso hídrico y sobre los ecosistemas por alta demanda agrícola, doméstica y pecuaria.		ALTO
2634	Río Cali	VALLE CAUCA DEL	Alta presión por el uso y en la calidad del recurso hídrico por alta demanda pecuaria y doméstica + servicios, principalmente.		ALTO

Fuente: Elaboración propia a partir de ENA 2014 (IDEAM, 2015b)

10 FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA Y COBERTURA DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

10.1 ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

La generación de aguas residuales es un producto inevitable de la actividad humana, éstas, según la Resolución 631 de 2015¹²¹, pueden dividirse en Aguas Residuales Domésticas – ARD y Aguas Residuales no Domésticas – ARnD, las primeras se definen como: *“las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios que corresponden a descargas de retretes y servicios sanitarios, descargas de los sistemas de aseo personal, de las cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa”*. Y las ARnD *“son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas”*.

Estas aguas residuales, pueden ser recolectadas y conducidas a una planta de tratamiento de aguas residuales - PTAR, de esta manera, el tratamiento y disposición adecuados de las aguas residuales supone el conocimiento de sus características físicas, químicas y microbiológicas y de los efectos que éstas pueden ocasionar sobre la fuente receptora ya sea un cuerpo de agua superficial o un sistema de alcantarillado público. El RAS 2000, define una planta de tratamiento de aguas residuales como el *“Conjunto de obras, instalaciones y procesos para tratar aguas residuales”* (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000b), por lo cual, **los sistemas de tratamiento no son sistemas únicos para un sector específico, sino por lo contrario, son obras adecuadas para tratar agua de diferentes características y que puede proceder del sector doméstico, industrial, agrícola, pecuario, minero o tratar aguas residuales combinadas de varios sectores**. En general, los sistemas de tratamiento de agua residual pueden ser de tipo preliminar¹²², primario¹²³, secundario¹²⁴ o terciario (avanzados)¹²⁵ definiéndose su tipo según el sistema más avanzado que presente el tren de tratamiento.

En la Tabla 63 se presentan los principales sistemas de tratamiento de agua residual doméstica y no doméstica según su tipología.

¹²¹ La Resolución 631 del 2015, establece los parámetros y valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

¹²² Tratamiento preliminar: Procesos físicos y/o mecánicos, como rejillas, desarenadores y trampas de grasa, que permiten la retención y remoción del material extraño, generalmente grasas, arenas y sólidos gruesos, presentes en las AR y que pueda interferir los procesos de tratamiento.

¹²³ Tratamiento primario: El objeto de este tratamiento es básicamente la remoción de los sólidos suspendidos y una fracción de la DBO en las aguas residuales, mediante el proceso físico de asentamiento en tanques de sedimentación.

¹²⁴ Tratamiento secundario: El objetivo de este tratamiento es remover la DBO soluble que no se remueve en un tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de sólidos suspendidos. Estas remociones se efectúan fundamentalmente por medio de procesos biológicos

¹²⁵ Tratamiento terciario: Proceso de tratamiento fisicoquímico o biológico usado para alcanzar un grado de tratamiento superior al de tratamiento secundario. Puede implicar la remoción de varios parámetros, como remoción de sólidos en suspensión, complejos orgánicos disueltos, compuestos inorgánicos disueltos, metales o nutrientes

Tabla 63. Principales sistemas de tratamiento de ARD y ARnD

Tipos de sistemas de tratamiento de agua residual				
Preliminar	Primario	Secundario	Terciario	Otros
Trampa de grasas	Tanque séptico	Lodos activados	Osmosis inversa	Emisarios submarinos
Desarenador	Sedimentadores primarios	Filtros percoladores	Microfiltración y ultrafiltración	Cloración
Rejillas	Tamices	Tanques Imhoff	Adsorción	
Cribado		Reactores UASB	Oxidación química	
		Reactores RAP	Intercambio iónico	
		+Reactores de circulación interna - IC®	**Reactor biológico secuencial SBR	
		+Reactor de manto de lodo granular expandido - EGSB		
		Filtros anaerobios		
		*Lagunas de oxidación o estabilización		
		Humedales		
		Biodiscos		

* Lagunas anaerobias, aerobias, facultativas, o de maduración.

+ Sistemas de tratamiento de tercera generación, los cuales dependiendo de su operación pueden clasificarse como sistemas terciarios.

++ A pesar de clasificarse como un sistema terciario de tratamiento, ya que puede remover nutrientes, si su operación se realiza con tiempos de retención celular bajos, este sólo removerá materia orgánica por lo que su clasificación sería como un sistema secundario.

En Colombia, con la Ley 99 de 1993 se dio el proceso de descentralización de los servicios públicos y con esta se reordenó el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables. Entre otras, esta Ley encargó a los municipios la función específica de ejecutar obras o proyectos de descontaminación de corrientes o depósitos de agua afectados por los vertimientos municipales, como son los sistemas de tratamiento de agua residual.

En el Conpes 3177 de 2002, “Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales” se establecieron cinco acciones prioritarias¹²⁶, en cuanto al tratamiento de aguas residuales, enmarcadas en la necesidad de priorizar la gestión, desarrollar estrategias de gestión regional, revisar y actualizar la normatividad del sector, articular las fuentes de financiación y fortalecer una estrategia institucional para la **implementación del Plan Nacional de Manejo de aguas Residuales – PMAR. Este último fue publicado y adoptado en el año 2004** y concentra las **acciones que debe emprender el Estado para disminuir la contaminación generada por las aguas residuales domésticas, que básicamente comprende reducciones en los niveles de DBO, SST y coliformes** y generar gestión para reducir la contaminación causada por las industrias que vierten sus aguas residuales a los alcantarillados

¹²⁶ 1. Selección y priorización de los municipios para la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales, 2. Estrategias de Gestión, 3. Revisión, actualización y desarrollo normativo para el ajuste de instrumentos de política, 4. Articulación de fuentes de financiación para inversiones en tratamiento de aguas residuales, 5. Estrategia institucional

En el año 2007, el Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico formuló el Programa “Saneamiento de Vertimientos – SAVER”, cuyo objetivo principal consistió en desarrollar acciones que permitieran alcanzar las metas establecidas en el Documento Colombia Visión 2019 y los Objetivos de Desarrollo del Milenio-ODM, para alcanzar el tratamiento del 50% del caudal de aguas residuales generadas en el país, en forma coordinada con los lineamientos del PMAR. **Este Plan priorizó los municipios del país, de acuerdo con el impacto ambiental generado por los vertimientos sobre las fuentes hídricas receptoras, y generó estrategias de corto, mediano y largo plazo para resolver esta problemática.** La priorización de los municipios que contaminan más dio como resultado que las cuencas críticas en el país son: Río Bogotá, Cuenca alta del Río Chicamocha, Río Medellín, Cuenca alta de Río Cauca, Río Suárez en los sectores de la Laguna de Fúquene y el Río Fonce), Río Pasto, Río Chinchiná, Cuenca de los Ríos Otún y Consota, Cuenca de los Ríos Quindío y La Vieja, Río de Oro. no obstante, las acciones se han enfocado en siete Cuencas de las diez priorizadas.

En Colombia, la mayor atención del gobierno nacional y de los gobiernos territoriales han estado en **primer lugar, en ampliar la cobertura y el acceso de la población al agua potable y al alcantarillado, y en segundo lugar, los esfuerzos se han enfocado en las áreas rurales y el efectivo tratamiento de las aguas residuales** (DNP, n.d.). No obstante, **a partir del año 2010, con El Plan de Desarrollo 2010-2014 “Prosperidad para todos” se inició en Colombia planteamientos enfocados a definir estrategias y objetivos de tratamiento de aguas residuales** que llevaron a impulsar los desarrollos en esta materia en el gobierno nacional. **En este PND se definió una meta para el tratamiento de las aguas residuales al año 2014 de 36%.** Priorizándose en este período inversiones en las cuencas de los ríos Bogotá, Cauca, Medellín, Chinchiná, Chicamocha, Otún-Consota y Fonce y en la Laguna de Fúquene.

Es así, como **a partir del año 2010 se generan políticas a nivel nacional enfocadas a incrementar el porcentaje de agua residual tratada;** así mismo desde 1993 se generó un marco institucional, en el cual a nivel nacional se dictan políticas y obligaciones en materia de tratamiento del agua residual y a nivel territorial se encuentran las Autoridades Ambientales responsables del cumplimiento de las disposiciones en esta materia (DNP, n.d.).

En Colombia, la evaluación integral más actualizada de la descarga de aguas residuales a los cuerpos de agua superficial se realizó en el ENA 2014 (IDEAM, 2014). Sin embargo, la información utilizada en el ENA 2014 presentó vacíos y además los años base para el análisis no fueron los mismos, así: la información correspondiente a las aguas residuales domésticas fue del 2008, para las aguas residuales industriales fue el 2010 y año 2012 para el vertimiento de aguas residuales provenientes del beneficio del café y del sacrificio de ganado, lo que supone una limitante a la hora de evaluar la problemática de las aguas residuales en Colombia.

Según el ENA 2014, las principales fuentes de contaminación hídrica son las aguas residuales domésticas y las aguas residuales industriales principalmente del sacrificio de ganado, beneficio del café, vertimiento de mercurio por la minería y el uso de agroquímicos. La mayor parte de los componentes contaminantes son la materia orgánica, los nutrientes, los metales pesados, los microorganismos patógenos y los sólidos en suspensión.

De otro lado, el Plan Nacional de Desarrollo 2014 - 2018 “Todos por un nuevo país”, proyectó como meta **para el año 2018 aumentar el porcentaje de agua residual urbana tratada pasando de 36,68% a 41,0% en dicho cuatrienio (DNP, 2014),** esto implica, la construcción de nuevas plantas de tratamiento, optimización

de las plantas actuales y planes de inversión en saneamiento, lo que permitiría mejorar la calidad del agua de las fuentes receptoras.

De acuerdo con información de la SSPD y reportada en el SUI, en el año 2010 se produjeron en el país 75,95 m³/s de aguas residuales domésticas producidas en áreas urbanas, se trataron 18,93 m³/s, lo que equivale a un 25% de aguas tratadas para ese año. Mientras que, para el año 2014, de los 76,35 m³/s, se trataron 28,02 m³/s, alcanzando un porcentaje de aguas residuales tratadas de 36,68%. En la Figura 48 se presenta el **porcentaje de tratamiento de agua residual municipal por año** (DNP, n.d.).

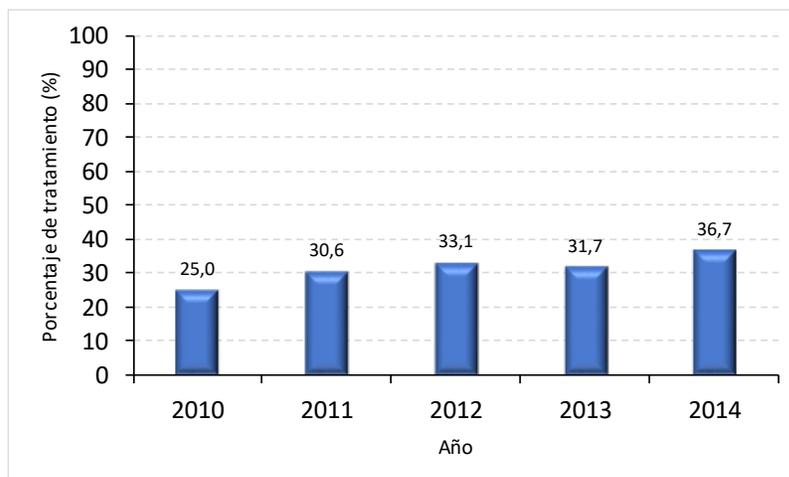


Figura 48. Porcentaje de tratamiento de agua residual municipal desde el año 2010 a 2014 en Colombia.

Fuente: Elaboración propia a partir de (DNP, n.d.)

El aumento presentado entre los años 2010 a 2014 se debió principalmente a la entrada en operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales correspondientes en ciudades como Barranquilla, Cartagena, Montería, en los municipios de Rionegro en Antioquia, Curumaní en Cesar, Ciénaga de Oro y Sahagún en Córdoba, Barrancas en La Guajira y Guamal en el Meta. (DNP, n.d.).

Para el año 2013 según información de la SSPD, en Colombia, 492 municipios contaban con sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR), lo que equivale a tan solo el 44% del total de los municipios (1.122 municipios registrados en el DANE en 2012), mostrando una grave problemática de saneamiento, manejo de vertimientos y calidad del agua de las fuentes receptoras. Estos 492 municipios cuentan con 620 sistemas de tratamiento, de las cuales: 29 son plantas de tratamiento de tipo preliminar, lo que representa un 4,68% del total, 86 son plantas de tratamiento de tipo primario (13,87% del total), 365 son plantas de tratamiento secundarias (58,87% del total), 2 plantas son de tipo terciarias (0,32% del total) localizadas en Soacha y Boyacá y finalmente, 138 plantas no registran información o se encuentran fuera de operación (Figura 49). En la Tabla 64 se presenta el caudal medio tratado y el número de sistemas de tratamiento para cada tipo de tratamiento (SSPD, 2014c).

Tabla 64. Tipo de tratamiento, número de sistemas de tratamiento de AR urbana y caudal medio tratado en Colombia (año base 2013).

Tipo de tratamiento	Número de sistemas de tratamiento	Porcentaje de sistemas de tratamiento	Caudal medio tratado (L/s)
Preliminar	29	4,68	69,30
Primario	86	13,87	10933,84
Secundario	365	58,87	12735,88
Terciario	2	0,32	2,80
Sin información o fuera de operación	138	22,26	--
Total	620	100	23741,82

Fuente: (SSPD, 2014c)

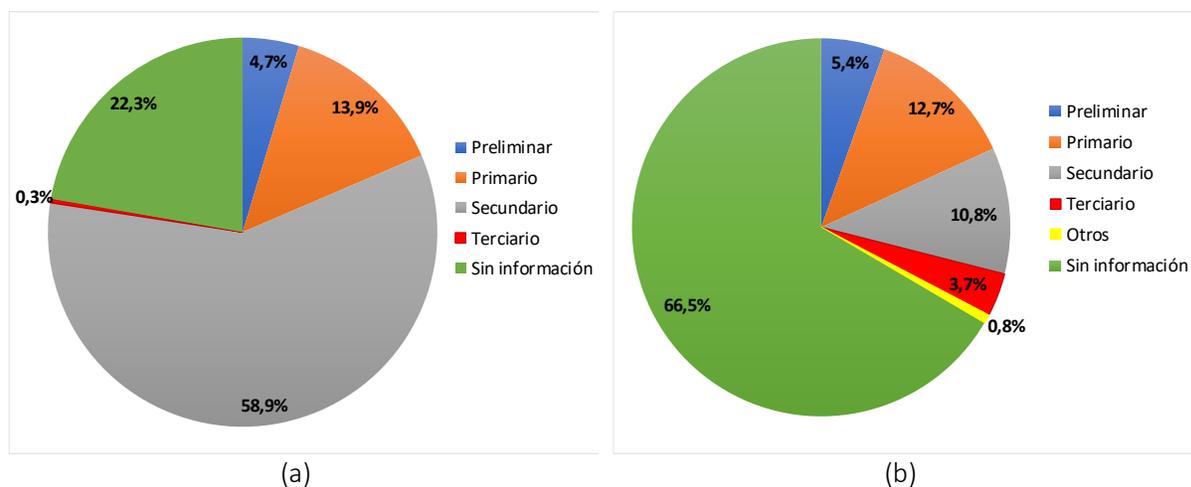


Figura 49. Tipo de sistemas de tratamiento de agua residual de mayor uso en Colombia. (a) Sistemas de tratamiento urbanos (SSPD, 2014c) y (b) sistemas de tratamiento reportados en el RUA 2016 para las 2830 industrias manufactureras (IDEAM, 2017)

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 65 se presenta el porcentaje de tratamiento de agua residual urbana por departamento, para el año 2014.

Tabla 65. Caudal vertido, caudal tratado y porcentaje de tratamiento de agua residual urbana en Colombia para el año 2014.

Departamento	Población urbana	Caudal vertido (m³)	Caudal tratado (m³)	% Tratamiento	Nº Sistemas de tratamiento de AR en operación
Amazonas	28.163	59,14		0,0%	
Antioquia	4.978.429	10454,70	2794,50	26,7%	85
Arauca	163.024	342,35	279,50	81,6%	5
Atlántico	2.325.617	4883,80	4249,20	87,0%	8
Bolívar	1.602.557	3365,37	2190,20	65,1%	4
Boyacá	716.672	1505,01	73,60	4,9%	12
Caldas	704.854	1480,19	14,40	1,0%	2
Caquetá	278.717	585,31	7,40	1,3%	1
Casanare	258.386	542,61	479,10	88,3%	17
Cauca	541.406	1136,95	81,20	7,1%	15
Cesar	755.318	1586,17	1447,30	91,3%	20
Chocó	243.375	511,09		0,0%	-
Córdoba	887.224	1863,17	615,20	33,0%	17
Cundinamarca	9.530.183	20013,38	5261,40	26,3%	67
Guainía	12.539	26,33	13,80	52,4%	1
Guaviare	63.626	133,61		0,0%	
Huila	682.816	1433,91	130,80	9,1%	12
La Guajira	509.562	1070,08	296,50	27,7%	16
Magdalena	913.299	1917,93	1153,40	60,1%	6
Meta	713.220	1497,76	337,60	22,5%	4
Nariño	845.498	1775,55	24,00	1,4%	2
Norte De Santander	1.052.983	2211,26	165,40	7,5%	14
Putumayo	165.095	346,70	35,00	10,1%	4
Quindío	492.667	1034,60	26,90	2,6%	2
Risaralda	739.817	1553,62	1,80	0,1%	1
San Andrés	54.513	114,48	154,80	100,0%	1
Santander	1.543.214	3240,75	534,20	16,5%	27
Sucre	562.590	1181,44	1,50	0,1%	6
Tolima	958.211	2012,24	333,10	16,6%	23
Valle Del Cauca	3.988.934	8376,76	7317,10	87,4%	21
Vaupés	16.584	34,83		0,0%	-
Vichada	30.175	63,37		0,0%	1
Total	36.359.268	76354,00	28019,00	36,7%	394

Fuente: DNP (n.d.)

A pesar de que las empresas de servicios públicos reportan información a la SSPD, no fue posible realizar un reporte posterior al año 2014 sobre las coberturas de sistemas de tratamiento de agua residual urbana, debido a los pocos registros existentes en el SUI. Por ejemplo, para el año base 2013 en el informe de la SSPD (2014) se reportan 492 municipios con PTAR, mientras que en el SUI la información publicada¹²⁷ corresponde a 468. Para los siguientes años el número de municipios con información en el SUI disminuye drásticamente, para el año 2014 se reporta información de 8 municipios, para el 2015 de 4 municipios y para el 2016 sólo 7 municipios, lo que no permite realizar un seguimiento a la evolución histórica de las PTAR en el país según la información recopilada en el SUI.

En cuanto a los STAR en el sector industrial, según el RUA (2016), sólo el 33,5% de industrias (de una muestra de 2.830) reportan que realizan algún tipo de tratamiento a las aguas residuales, de los cuales el 12,7% realiza un tratamiento primario, el 10,8% un tratamiento secundario y sólo el 3,7% corresponde a sistemas terciarios. El restante 66,5% de industrias (1.883) no realizan ningún tipo de tratamiento o no reportan información (Figura 49) y de estas, 308 industrias realizan vertimientos directos a cuerpos de agua superficial mientras que las demás lo realizan a un sistema de alcantarillado público o privado. Es de aclarar, que la información reportada en el RUA (2016) presenta inconsistencias como, por ejemplo, que de las 1.883 industrias que informaron no tener ningún tipo de STAR, 491 si reportaron un volumen de agua residual tratado lo cual no es contradictorio (Figura 49).

Según lo anterior, el 72,8% de los sistemas de tratamiento de agua residual urbana en Colombia y el 28,9% de los STAR industriales, sólo realizan tratamiento primario o secundario es decir que, en el país, los sistemas de tratamiento de agua residual son diseñados principalmente para la remoción de materia orgánica como DBO₅ y SST y no para la remoción de nutrientes ni otros elementos como los metales pesados o compuestos persistentes. Lo cual puede deberse a que, el principal instrumento de control que realizan las Autoridades Ambientales sobre los vertimientos puntuales es a través de la tasa retributiva¹²⁸, en la cual sólo se realiza un cobro por remoción de materia orgánica (DBO) y SST.

En América latina, los sistemas de tratamiento más utilizados son los procesos de lodos activados, las lagunas de estabilización y el reactor anaerobio de lecho de lodos (UASB), de los cuales el reactor UASB se ha consolidado como una opción cada vez más aplicada en el tratamiento de aguas residuales municipales en las últimas dos décadas (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013). En la Figura 50 se presenta la distribución de las tecnologías de tratamiento para algunos países de América Latina y el Caribe. Se puede observar que las tres tecnologías más usadas, cubren el 80% de la muestra total de PTAR.

¹²⁷ http://reportes.sui.gov.co/reportes/SUI_ReporteAlcantarillado.htm fecha de consulta 30 de noviembre 2017.

¹²⁸ La tasa retributiva por vertimientos puntuales fue creada por el Decreto – Ley 2811 de 1974 y en el tiempo ha tenido modificaciones importantes hasta llegar al Decreto 2667 de 2012 vigente hasta el día de hoy

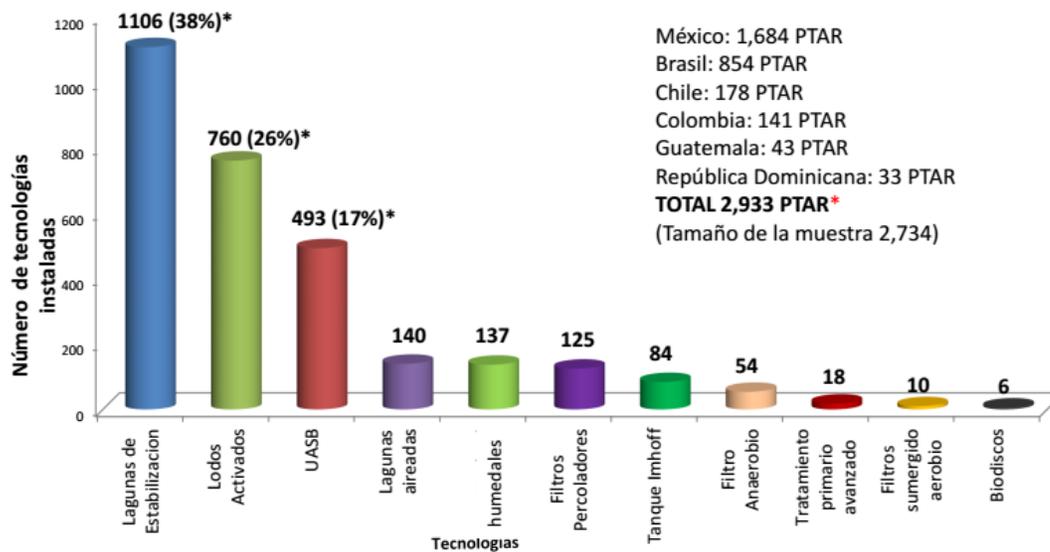


Figura 50. Procesos aplicados en el tratamiento de aguas residuales en países seleccionados.
 Distribución por tecnologías
 Fuente: (Noyola, 2012)

De acuerdo con (Noyola, 2003) los sistemas de tratamiento de tipo biológico son los más adecuados para el tratamiento de aguas residuales biodegradables como es el caso de las aguas de origen municipal y a su vez los sistemas anaerobios poseen menos requerimientos energéticos y representan una tecnología perdurable.

Para el caso de zonas urbanas, los sistemas de tratamiento compactos, son más viables por encima de los sistemas naturales debido a la escasez y alto costo de terrenos amplios, los cuales son requeridos en sistemas de tratamiento naturales. Sin embargo, en algunos casos en los que los costos de operación deban ser reducidos y existan limitaciones de terreno, una adecuada combinación entre procesos compactos con menor grado de mecanización y algunos procesos naturales representará una buena opción para el tratamiento de aguas residuales (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013).

En Colombia, según el informe Técnico sobre Sistemas de Tratamiento de Aguas Residual (SSPD, 2014c) los sistemas de tratamiento más usados son: lagunas de estabilización (26%), lo que está asociado a los bajos costos de diseño y la disponibilidad de terreno para el uso de estos sistemas de tratamiento, han sido tradicionalmente empleados en pequeños municipios, sin embargo, la falta de mantenimiento de estos sistemas ha demostrado que con el tiempo constituyen un costo de operación y mantenimiento alto, si se quiere mantener la eficiencia. En segunda instancia, los reactores aerobios de lodos activados (17%), sistemas empleados en grandes ciudades, como por ejemplo Medellín, en la PTAR de San Fernando y en la PTAR Bello en construcción, siendo procesos que permiten buenas eficiencias de remoción de materia orgánica típica del sector agua potable y saneamiento básico (cargas bajas de $DBO_5 \cong 400 \text{ mg/L}$), pero con la limitante de requerir una fuente de oxígeno externa, lo que suele encarecer el sistema. En tercer lugar, se encuentran los reactores anaerobios UASB (8%), los cuales presentan mejores eficiencias de tratamiento para cargas orgánicas altas ($>1.000 \text{ mg/L } DBO_5$) y que son características de aguas residuales provenientes de actividades pecuarias, sin embargo, estos sistemas son comúnmente implementados como tratamiento principal para aguas residuales domésticas, cuyas concentraciones típicas de materia orgánica son bajas ($\leq 400 \text{ mg/L } DBO_5$) por lo cual las eficiencias de tratamiento pueden no ser las

esperadas. Finalmente, los filtros percoladores (3%) que suelen ser usados como procesos de pulimiento posterior a un tratamiento previo. Los demás, corresponden a tratamientos tales como emisarios submarinos, cloración y tratamientos primarios y preliminares y un alto porcentaje de prestadores (18%) no reporta la información al SUI (Figura 51).

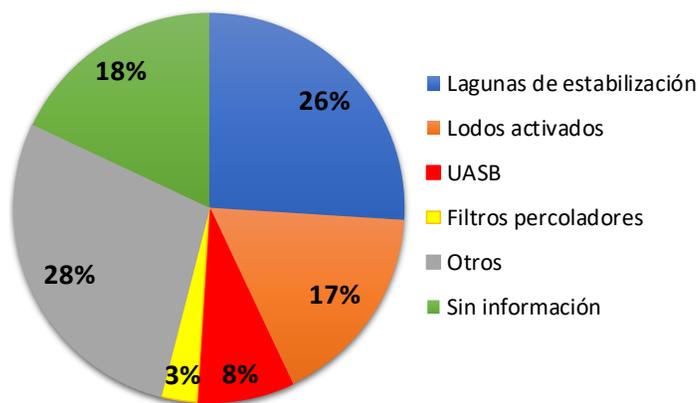


Figura 51. Sistemas de tratamiento de agua residual urbana más comunes en Colombia
Fuente: Elaboración propia a partir de SSPD, (2014)

La carga total de DBO generada por los sectores domésticos, industrial y cafetero se estimó en 2008 en 819.235 toneladas al año, de los cuales se removió el 11% a través de tratamiento de aguas residuales (IDEAM, 2015a). Esto significa que la carga orgánica biodegradable vertida a los sistemas hídricos alcanzó 729.300 toneladas, que equivalen a 2026 toneladas por día.

Según el ENA 2014, El sector agua potable y saneamiento básico aportó 65% de la carga contaminante total de DBO; la industria el 29%; y el sector cafetero el 6%¹²⁹. El sector agua potable y saneamiento básico removió el 16% del DBO. La carga total de la DQO vertida a los cuerpos de agua del país durante el 2008 se estimó en 1'618.200 toneladas, equivalentes a 4500 ton/día. De esta carga contaminante, la industria aportó el 39%; el sector agua potable y saneamiento básico, el 58%; y el sector cafetero, un 3%.

El sector agua potable y saneamiento básico y el sector pecuario son los principales responsables de los vertimientos de carga orgánica en el país, seguido por el sector industrial. Este panorama, acompañado de las bajas reducciones de dichos aportes por el tratamiento de las aguas residuales, genera la necesidad de grandes esfuerzos futuros en el sector del saneamiento hídrico, no solo en la construcción de nueva infraestructura, sino también en la optimización de infraestructura existente y en la aplicación de nuevos paradigmas como la valorización y aprovechamiento de las aguas residuales.

En la Tabla 66 se presenta una recopilación de la eficiencia de remoción (%) de diferentes tecnologías de tratamiento de agua residual, para algunos contaminantes característicos de las ARD y ARnD.

¹²⁹ En el ENA 2014 solo se incluyeron datos de vertimiento para los sectores industrial, doméstico y beneficio de café ya que para el sector pecuario no se cuenta con datos actualizados y publicados de los factores de vertimiento, igualmente se menciona los problemas de medición de vertimientos contaminantes debido a las cargas difusas del sector pecuario.

Tabla 66. Eficiencia de remoción de contaminantes por tecnología de tratamiento de aguas residuales.

TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	REFERENCIA	EFICIENCIA DE REMOCIÓN (%)									
		SST	DBO ₂	DQO	N NH ₃	N ORG	N NO ₃	N TOTAL	P PO ₄	P TOTAL	COLIFORMES
Desarenador convencional	RAS (2000)	0-10	0-5	0-5							
	Metcalf & Eddy (2001)	0-10	0-5	0-5							
Sedimentador primario	Metcalf & Eddy (2001)	50-65	30-40	30-40		10-20			10-20		
	Fair (1954)	40-70	25-40	20-35						25-75	
	Yañez (1995)	40-70	25-40							25-75	
Tanque séptico	Batalha (1989)	50-70	40-62					<10	<10	<60	
Tanque séptico - filtro	Von Sperling (1996)		70-90					10-25	10-20	60-90	
Tanque Imhoff	Tchobanoglous (2000)	50	40								
Primario avanzado	Yañez (1995)	70-90	50-85							40-80	
	Tsukamoto (2002)	73-84	46-70					<30	10-20	80-90	
	RAS (2000)	60-70	65-80	60-80					30-40		
Filtro anaerobio	Rodríguez et al. (2006)			75-85							
	Torres (2000)	60-80	60-70					10-25	10-20	60-90	
UASB	RAS (2000)	60-70	65-80	60-80					30-40		
	Valencia (2002)	72	83	74							
	Lettinga et al (1983)			55-78							
UASB - laguna facultativa	CDMB (2006)	84	88								
UASB - lodo activado	Van Haandel - Lettinga	85-95	85-95					15-25	10-20	70-95	
UASB - lodo activado SBR	Torres (2000)	84-86	87-93					20-90	23-72		
Reactor anaerobio de flujo pistón RAP	RAS (2000)	60-70	65-80	60-80					30-40		
Reactor anaerobio de contacto	Rodríguez et al. (2006)			75-90							
Reactor anaerobio de lecho fluidizado	Rodríguez et al. (2006)			80-85							
Lodo activado convencional	RAS (2000)	80-90	80-95	80-95		15-20			10-25		
	Yañez (1995)	85-98	70-98							95-98	
	Fair (1954)	55-95	55-95	50-80						90-98	
	Von Sperling (1996)	80-90	85-93					30-40	30-45	60-90	
Lodo activado - SBR	Von Sperling (1996)	80-90	85-95					30-40	30-45	60-90	
Lodo activado - aireación prolongada	Von Sperling (1996)	80-90	93-98					15-30	10-20	65-90	
	Yañez (1995)	70-90	60-85							90-95	
Filtro percolador alta tasa	Metcalf & Eddy (2001)	60-85	65-80	60-80	8-15			15-30	8-12	90-95	
	Von Sperling (1996)	85-95	80-93					30-40	30-45	60-90	
Filtro percolador súper tasa	RAS (2000)	65-85	65-85	65-85	8-15	15-50			8-12		
Laguna aerobia	Ferrer (2009)		60-80								
	Mara (1980)		50-85								
Laguna anaerobia	Arceivala (1984)		30-70								
	RAS (2000)	20-60	50-70							90-99,99	
Lagunas aireadas	Mara (1980)		80-95								
	Mendoza (2000)		50-60								
	RAS (2000)	85-95	80-95							90-99,99	
Lagunas facultativas	RAS (2000)	63-75	80-90						30	90-99,99	
	Fair (1954)	85-95	90-95	70-80						95-98	
	Yañez (1995)	90-99	75-95							98-99,99	
Lagunas maduración	Mara (1980)		80-95								
	RAS (2000)	85-95	60-80							90-99,99	
Laguna anaerobia - humedal	Caicedo (2005)	87-93	80-90					37-48	45-50		
	Liu & Liptack (2000)		85-95								
Biodiscos	Torres et al. (2006)	85-95	85-93					30-40	30-45	60-90	
	Metcalf & Eddy (2001)	80-85	80-85	80-85	8-15			15-20	10-25		

Fuente: (J.P Rodríguez, García, & Pardo, 2015)

10.2 PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA COBERTURA DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

10.2.1 PRIORIZACIÓN DEL GOBIERNO PARA LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

En Colombia, según el Decreto 475 de 1998, **la priorización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales se encuentra en un nivel inferior de prioridad** y se le da prioridad primero al suministro de agua potable, seguido de la recolección y disposición de aguas residuales (sistemas de alcantarillado), posterior a la disposición y recolección de residuos sólidos y finalmente a los sistemas de tratamiento de AR (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000a). Lo anterior ha obligado a los prestadores del servicio público a dar prioridad a proyectos de inversión para aumentar la cobertura de agua potable y de alcantarillado a valores superiores del 85% (nivel de complejidad Alto) y 95% (nivel de complejidad Bajo) de agua potable y de 70% (nivel de complejidad Alto) y 85% (nivel de complejidad Bajo) para alcantarillado.

De las veinticinco ciudades colombianas que a 2035 tendrán más de 300.000 habitantes, 12 ciudades aún no cuentan con sistema de tratamiento de agua residual en ejecución o finalizado; por lo tanto, **los esfuerzos del gobierno nacional deben enfocarse a la solución de las necesidades de tratamiento de agua residual en estas ciudades, con lo cual se lograría el tratamiento del 63% de las aguas residuales en Colombia, según** proyecciones del DNP (n.d.). Dado que según lo investigado en el país se encuentran alrededor del 40% de las Plantas de Tratamiento de Aguas residuales, no operando a su plena capacidad, fuera de operación, entre otros, una **alternativa es impulsar esquemas regionales que permitan la operación y mantenimiento de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.**

10.2.2 FINANCIACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

La mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que entraron en operación requirieron **operaciones de financiación por parte de la banca multilateral; así mismo, dada la estructura tarifaria definida a través de la Resolución CRA 287 de 2004 vigente hasta 2014, los costos asociados a la inversión y operación de estos sistemas se involucraron en la tarifa de prestación del servicio de alcantarillado, incrementando los valores pagados por este concepto dependiendo de cómo se hubiera realizado la transacción de construcción del sistema**(DNP, n.d.).

En Colombia, **las principales fuentes de financiación del sector son Sistema General de Participaciones, Regalías, Presupuesto General de la Nación y recursos vía tarifas.** Esta última representa el 31% del total de los recursos financieros del sector. Actualmente, si bien hay fuentes y entidades que propenden por **el tratamiento de aguas residuales en Colombia; no hay una fuente de destino exclusivo y la responsabilidad se encuentra diluida entre las administraciones municipales, los prestadores de servicios públicos y las autoridades ambientales,** quienes de acuerdo con su disponibilidad de recursos y priorización de actividades deciden realizar inversiones en ocasiones de manera desarticulada y perdiendo de vista la sostenibilidad de la infraestructura en la medida que el tratamiento sea efectivo en su objetivo de evitar la contaminación de las fuentes hídricas.

Sin embargo, en el informe “Documento Plan Director de Agua Residuales” publicado por el DNP (n.d.) se identificó que a pesar que las ciudades del país han contado con recursos que permitieran la

superación de las principales necesidades de infraestructura (redes de agua potable y saneamiento básico, entre otros) *“aún persiste un retraso en las inversiones efectuadas con una tasa promedio de inversión per cápita que crece menos que el ingreso per cápita y que los recaudos tributarios per cápita. Esta situación se refleja en que las ciudades pequeñas e intermedias presentan mayores rezagos en infraestructura y equipamientos que las grandes, fenómeno ligado también a su limitada capacidad institucional, y de otra parte, a la rigidez del modelo actual de transferencias.”* (DNP, n.d.).

También se han realizado esfuerzos regionales y locales para la construcción de infraestructura necesaria para mitigar la contaminación hídrica. Sin embargo, estos han sido limitados porque **las Autoridades Ambientales Regionales¹³⁰ (AAR) y los municipios, no han contado con las herramientas suficientes para desarrollar programas y proyectos de manejo y tratamiento de aguas residuales** (PNMAR, 2004)

Dados los altos costos que implican el sistema de tratamiento de aguas residuales en los cuales se incluyen el sistema de colectores y las plantas de tratamiento, **surge como alternativa para su financiamiento las Asociaciones Público Privadas - APP, las cuales se impulsan desde el Plan de Desarrollo 2014 – 2018, y su aplicación fue reglamentada a partir del Decreto 063 de 2015¹³¹** para facilitar el uso del esquema de APP en la construcción, operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Sin embargo, aún **se requiere un adecuado control institucional de vertimientos y el tratamiento de agua residual en condiciones de eficiencia y sostenibilidad**, ya que, si bien pueden existir sistemas de tratamiento de agua residual, es necesario que se controle la eficiencia del tratamiento, así como las condiciones del agua residual vertida a los cuerpos receptores.

10.2.3 POLÍTICAS DE PROTECCIÓN DE CUENCAS Y CAMPAÑAS DE USO RACIONAL DEL AGUA

Desde que el Gobierno Nacional dio inicio a su política de protección de cuencas¹³², se ha observado una leve evolución en las aguas residuales que son sometidas a algún tipo de tratamiento (Figura 48), no obstante, para el año 2013 se observó un decrecimiento en el tratamiento de las mismas, ocasionado por factores como el fenómeno del niño al que se vio expuesto el país durante ese año.

De otra parte, factores como el uso racional del agua, campañas impulsadas desde el gobierno nacional han repercutido en el manejo y uso que la población le da al agua potable, y que ocasiona que el caudal de las aguas residuales que llegan a los sistemas de tratamiento sea menor (DNP, n.d.)

10.3 PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

10.3.1 DESCONOCIMIENTO EN EL ARRANQUE DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO

El proceso de arranque de una PTAR es un factor fundamental para el éxito de ésta, más aun, cuando la planta de tratamiento es de tipo biológica, lo que incluye un proceso de aclimatación y estabilización de

¹³⁰ Corporaciones autónomas regionales, Corporaciones para el Desarrollo Sostenible y Autoridades Ambientales de los Grandes Centros Urbanos

¹³¹ Por el cual se reglamentan las particularidades para la implementación de Asociaciones Público Privadas en el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico

¹³² Decreto 1729 de 2002 (modificado por el Decreto 1640 de 2012), por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos.

los microorganismos a emplear. El arranque de una PTAR es un proceso lento, en el cual una carga mínima de agua residual es ingresada con el objetivo de evaluar el funcionamiento de cada unidad. En el caso de tratamientos secundarios biológicos, las bajas cargas suministradas permiten a los microorganismos aclimatarse al nuevo sustrato y generar un crecimiento poblacional adecuado. En el caso de tratamientos secundarios fisicoquímicos, las bajas cargas permiten estandarizar las cantidades adecuadas de reactivos. A medida que se alcanzan eficiencias óptimas la carga se incrementa progresivamente y de esta manera se asegura un control total sobre el proceso.

Convencionalmente en Colombia, el proceso de arranque de las plantas de tratamiento ha sido relegado, dejando a un lado su importancia e impactando directamente sobre el adecuado funcionamiento del proceso, donde operarios sin capacitación previa asumen el control total de un sistema de tratamiento.

En muchas situaciones, el arranque de la planta lo realizan ingresando la carga máxima, presionando al sistema a trabajar bajo las condiciones extremas, esto trae como consecuencia; muerte celular en las bacterias ya que no están aclimatadas al nuevo sustrato, disminución en el pH debido a la generación de ácidos grasos volátiles (AGVs) en el caso de reactores anaerobios, lo que inactiva las arqueas metanogénicas, las cuales son las finales responsables de transformar la materia orgánica de bajo peso en metano. Deterioro de las bombas cuando se cuenta con estaciones de bombeo, obstrucción y colmatación de los sistemas ya que no se tienen estandarizados los tiempos adecuados de mantenimiento, consumo excesivo de reactivos debido a la falta de estandarización en las dosificaciones. El arranque progresivo de las plantas de tratamiento permite, además, corregir fallos en el proceso o diseño y optar por acciones de mejora. Finalmente, años atrás, las plantas de tratamiento biológicas se arrancaban con estiércol o simplemente sin inóculo retrasando aún más el proceso de arranque de la planta. Actualmente, los estudios han demostrado que inocular los reactores con lodo proveniente de otras plantas de tratamiento, incrementa las eficiencias y disminuye los tiempos de aclimatación de los microorganismos al proceso (UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2009), sin embargo, algunas plantas prefieren continuar con teorías antiguas y no inocular los reactores o emplear estiércol, lo cual genera en muchas situaciones obstrucciones en las demás unidades, malos olores y bajas eficiencias.

10.3.2 PERSONAL NO CAPACITADO PARA OPERAR LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Los operarios requieren un conocimiento específico sobre la planta de tratamiento que van a operar, cada sistema de tratamiento debe ser monitoreado a partir de diferentes parámetros, no solamente se requiere el mantenimiento físico frecuente de cada una de las unidades de tratamiento, sino que también es necesario hacer mediciones *in situ* que garanticen el correcto funcionamiento de los sistemas; mediciones tales como el pH, medición de caudal y alcalinidad (fundamentalmente en sistemas de tratamiento anaerobios) son la base de los procesos de tratamiento y permiten garantizar en el caso de los reactores biológicos la operación de las bacterias. La mayoría de los operarios, tienen el conocimiento para realizar el mantenimiento de las plantas, sin embargo, temas relacionados con mediciones fisicoquímicas, purgas de lodos, toma de muestras y operación de bombas, son cruciales y muchas veces son ignorados por los operadores de las plantas debido a que, en muchos casos, no cuentan con una formación profesional para realizarlo adecuadamente, lo que lleva a fallas en los sistemas, consumos de reactivos innecesarios y bajas eficiencias de operación de los procesos.

10.3.3 INADECUADA SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA EL TIPO DE AGUA A TRATAR

Todas las aguas residuales tienen características particulares, por lo tanto, es fundamental realizar la caracterización adecuada y a partir de ésta plantear la alternativa de tratamiento más eficiente.

Históricamente en Colombia, la alternativa de tratamiento más común para las aguas residuales domésticas han sido los reactores anaerobios y las lagunas de oxidación, esto asociado a los bajos costos de instalación, ya que son alternativas que no requieren aireación, **sin embargo, los sistemas anaerobios suelen operar eficientemente con cargas altas de materia orgánica, situación que no es propia del agua residual doméstica**, y en cuanto a las lagunas de estabilización, los pretratamientos deben ser capaces de reducir los sólidos y las grasas, de tal manera que no ocasionen obstrucciones en las lagunas y no disminuyan la capacidad receptora de éstas por acumulación de lodos en el fondo. Este panorama, muestra que, **en Colombia, la decisión de proponer un tren de tratamiento para las aguas residuales está basada en primera instancia en los costos asociados al diseño e instalación, pero pocas veces se evalúa el costo asociado a las fallas que se presentan posteriormente**, lo que en muchas situaciones representa inversiones aún mayores que el mismo costo inicial de la planta de tratamiento.

10.3.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO OBSOLETOS

La innovación tecnológica y los avances en la investigación han permitido realizar modificaciones a los procesos de tratamiento convencionales, de esta manera, por ejemplo, los reactores anaerobios convencionales de tipo UASB, han llegado a modificaciones de reactores de circulación interna – IC® (por sus siglas en inglés) o reactores de manto de lodo granular expandido – EGSB (por sus siglas en inglés), permitiendo alcanzar eficiencias de remoción mayores al 90%. De otro lado los reactores aerobios como los lodos activados han migrado a sistemas como por ejemplo los SBR que permiten la remoción conjunta de materias orgánicas y nutrientes dentro del mismo reactor. En la Figura 52 se muestra un ejemplo de cómo en Estados Unidos se evidenció un mayor aumento de los sistemas IC® y una disminución en los sistemas UASB entre los años 2002 a 2007 respecto a lo presentado entre los años 1981 a 2007 para tratar las aguas residuales industriales (UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2009).

En Colombia, los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales han sido usados durante años, de hecho, en países europeos donde actualmente prevalecen reactores anaerobios de tercera generación (EGSB o IC®), **en Colombia todavía empleamos de manera extensiva los reactores de primera generación (Tanques sépticos, sistemas Imhoff) o sistemas de segunda generación como los reactores UASB**. Es por esto que la inversión en procesos tecnológicos para el tratamiento de las aguas es indispensable para asegurar una calidad de las aguas óptimas y un mejor manejo y disposición de los vertimientos.

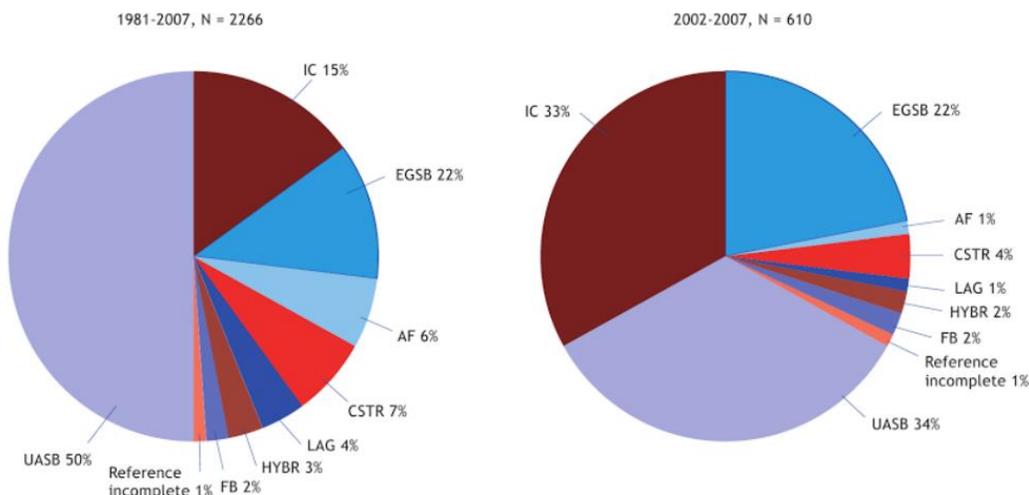


Figura 52. Implementación de tecnologías anaerobias para agua residual industrial entre los periodos 1981 a 2007 (izquierda) y 2002 a 2007 (derecha).

Fuente: (UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2009)

10.3.5 NORMATIVIDAD Y FALTA DE SANCIONES MÁS ESTRUCTAS

En tema de aguas residuales el país ha sufrido un retraso importante, la normatividad de residuos líquidos que inicialmente fue el Decreto 1594 de 1984 y que actualmente fue derogada por la Resolución 631/2015, si bien es importante señalar que el cambio favoreció en algunos aspectos, como por ejemplo un cumplimiento en términos de concentración y una caracterización en términos del tipo de sector industrial o doméstico. De esta manera los instrumentos de control siguen siendo laxos y no permiten que las plantas de tratamiento migren a sistemas más tecnológicos y eficientes.

10.3.6 FALTA DE PRIORIDAD EN EL TEMA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

Para mejorar la eficiencia y cobertura de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, debe haber un interés por parte del Estado y existir un trabajo conjunto entre entidades públicas y privadas, que permita poner en marcha proyectos para la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales y que a su vez garanticen su correcta operación y mantenimiento. Debe existir una coordinación en las acciones y una definición clara de competencias que permitan el logro de los objetivos de descontaminación de los cuerpos de agua (MAVDT; DNP, 2004; SSPD, 2014).

Se deben desarrollar e implantar sistemas administrativos, financieros y tecnológicos que respondan adecuadamente a las necesidades y limitaciones de los usuarios locales, ya que generalmente se han utilizado tecnologías extranjeras que han presentado limitaciones por requerir montos de inversión y operación muy elevados, además de incrementar la dependencia tecnológica. Actualmente la diversidad de tecnologías de tratamiento dificulta la evaluación y selección del sistema de tratamiento más adecuado para cada caso específico, sin embargo, uno de los criterios a considerar es que el mejor tren de tratamiento será aquel que con el menor costo y la menor complejidad, alcance el nivel de calidad de agua requerido para su descarga al medio natural o para su reúso (Noyola, 2003).



Departamento
Nacional
de Planeación



11 ESTIMACIÓN DE COSTOS MARGINALES DE CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA

El problema de contaminación por aguas residuales ha sido reconocido por la comunidad internacional, que busca estrategias para mitigar el impacto ambiental de este fenómeno y garantizar la oferta de agua apta para el consumo humano. De hecho, dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Organización de Naciones Unidas (ONU), el sexto se denomina Agua Limpia y Saneamiento, el cual reconoce que, aunque la oferta de agua dulce a nivel mundial es suficiente para el sostenimiento de la vida, su distribución entre países no es equitativa y se estima que para 2050 el 25% de la población mundial vivirá en un país afectado por escases de agua dulce (ONU, 2015).

Es necesario que los países implementen estrategias en procura de mejorar la calidad del agua. Esto se logra desde diferentes frentes, como por ejemplo los instrumentos económicos que incentivan la reducción de los vertimientos de aguas residuales, las tecnologías de tratamiento y saneamiento, la protección de áreas específicas como los páramos, entre otras.

En este numeral se busca estimar una función de costos marginales de construcción para plantas de tratamiento de agua residual en Colombia, como un instrumento guía para la evaluación costo beneficio de las mismas. El documento presenta dos secciones. Una sección de metodología y otra con la presentación de los resultados del modelo de costos marginales de construcción de PTAR junto con su análisis.

Los costos de construcción de una PTAR están asociados al tipo de tratamiento que utilizan y deben estar contemplados en su estimación. En términos generales, entre más avanzado sea el tipo de tratamiento, más costosa será la construcción de la PTAR.

En cuanto a los costos de construcción, se cuenta con pocos estudios previos al respecto, dada la dificultad para la obtención de información. En Colombia se cuenta con estudios como el de (Salas, Zapata, & Guerrero, 2007), quienes para enfrentar la falta de información plantearon la estimación de costos referentes a construcción, mantenimiento y operación diferenciados por tecnologías por medio de una simulación matemática para la ciudad de Pereira. Para el caso de costos de construcción presentan una función de costos en función del caudal, encontrando que los costos que crecen más rápido son los de tanques sépticos y humedales de flujo superficial.

Otro estudio sobre costos de construcción en Colombia es “Planificación ambiental hídrica estacional: función de costos mediante análisis multivariado para plantas de tratamiento de aguas residuales” presentado por (Juan Pablo Rodríguez, García, & Beltran, n.d.), quienes estiman funciones de costo del tipo *Cobb Douglas* para tres tipos de tecnología: Lodos activados, reactor anaerobio y lagunas de oxidación. Proponen como variables explicativas además del caudal, la eficiencia de remoción de demanda biológica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST) y nitrógeno (N). Utilizan como muestra 51 PTAR o proyecto de PTAR de la jurisdicción de la Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR). Para las tres funciones estimadas se encontró que el parámetro de elasticidad costo del caudal estaba en el intervalo (0, 1), es decir, que se presentan economías de escala.

11.1 Metodología

Para estimar los costos marginales de construcción de las PTAR es necesario buscar una forma funcional que relacione una variable *proxi* del costo de construcción con una variable *proxi* del tamaño de la planta, en este caso el costo de construcción por habitante en dólares y el caudal de diseño de la PTAR, respectivamente.

Después de analizar el funcionamiento de las PTAR se encuentra que se pueden clasificar por tipo de tratamiento: Preliminar, primario, secundario y terciario. Entonces se propone estimar una función de costo marginal de construcción para cada tipo de tratamiento, introduciendo variables *dummy*¹³³ para cada una. En cuanto a nivel de tratamiento, sería posible tomar la eficiencia de remoción de DBO y la eficiencia de remoción de SST, tal como lo hicieron (Juan Pablo Rodríguez et al., n.d.), pero en Colombia la normatividad establece que estas eficiencias de remoción deben ser iguales o superiores al 80%, por lo que se asumen constantes y no enriquecen el modelo, por lo tanto, no serán tenidos en cuenta. Así entonces, la función de costo total a estimar se puede expresar de la siguiente manera (Ecuación 13):

Ecuación 13. Función de costo de construcción a estimar

$$\log(CH)_i = A + \beta_1 \log(CD)_i + \delta_1 trat_1 + \delta_2 trat_2 + \dots + \delta_n trat_n$$

Donde:

- *CH*: Costo de construcción por habitante de la PTAR (UDS/Habitante).
- *CD*: Caudal de diseño de la PTAR (m³/segundo).
- trat_i*: Variable *dummy* que toma valor de 1 si el dato de costo y caudal corresponde a la tecnología *i* y valor de 0 en otro caso.
- β_1 : Parámetro de sensibilidad o elasticidad de *CH* ante cambios en la *CD*.
- δ_i : Parámetros asociados al tipo de tecnología de cada PTAR.

Esta estimación permite encontrar funciones de costos por tipo de tratamiento que comparten la misma pendiente, pero tienen intercepto diferente, así (Ecuación 14):

Ecuación 14. Función de costos de construcción por tipo de tratamiento a estimar

$$\log(CH)_i = A + \delta_i + \beta_1 \log(CD)_i$$

Tomando exponencial, la función de costo por habitante, por tipo de tecnología es de la forma (Ecuación 15):

Ecuación 15. Forma *Cobb Douglas* de la función de costo de construcción a estimar

$$CH_i = (\exp(A + \delta_i)) * CD^{\beta_1}$$

Dado que el costo de construcción es un monto invertido una vez en el tiempo, estos modelos deben utilizar datos de corte transversal¹³⁴ para ser estimados. La estimación se hace por medio de mínimos cuadrados ordinarios¹³⁵. Una vez estimados los modelos para cada tipo de tratamiento se les aplican

133 Son variables de carácter cualitativo que permiten estimar los modelos restringido y no restringido, también se conocen como variables categóricas, dicótomas, binarias, ficticias o cualitativas. Usualmente, dichas variables indican la presencia o ausencia de una cualidad o atributo.

134 Un conjunto transversal de datos contiene observaciones sobre múltiples fenómenos en un momento determinado. En este caso, el orden de las observaciones es irrelevante.

135 En estadística, los mínimos cuadrados ordinarios (MCO) o mínimos cuadrados lineales es el nombre de un método para encontrar los parámetros poblacionales en un modelo de regresión lineal. Este método minimiza la suma de las distancias verticales entre las respuestas observadas en la muestra y las respuestas del modelo.

pruebas de validación como lo son pruebas de normalidad en el término de error (test de Shapiro¹³⁶ y test Jarque Bera¹³⁷), pruebas de heteroscedasticidad (test de Goldfeld y Quandt¹³⁸) y pruebas de multicolinealidad (Factor de Varianza Inflada¹³⁹), con el fin garantizar que cumplan con los supuestos del modelo clásico de regresión lineal¹⁴⁰, en caso que no cumpla al menos uno de los supuestos, se corrige el modelo por medio de una estimación de mínimos cuadrados generalizados. Finalmente, para pasar de la función de costo por habitante a la función de costo marginal, se deriva la primera respecto al caudal de diseño, así (Ecuación 16):

Ecuación 16. Función de costo marginal de construcción a estimar

$$Cmg_i: \frac{\partial CH_i}{\partial CD_i}$$

Donde:

- Cmg_i : Costo marginal por habitante de construir una PTAR con un 1% más de capacidad
- CH : Costo de construcción por habitante de la PTAR (USD/habitante).
- CD : Caudal de diseño de la PTAR (m³/segundo).

Lo que se espera de esta estimación es determinar si en las PTAR existen economías de escalas, es decir, que a medida que se construyen PTAR con mayor caudal de diseño, disminuye el costo marginal de construcción. Esto se comprueba si el parámetro β_1 estimado se encuentra en el intervalo (0; 1), lo que indica que la función de costo por habitante crece a tasas decrecientes.

11.2 Resultados

No fue posible obtener información sobre costos de construcción para el total de las PTAR registradas en el país. Sin embargo, en el Plan Director de Aguas Residuales en Colombia (Departamento Nacional de Planeación DNP, n.d.), se presenta una estimación de costos de construcción por habitante para 26 PTAR en el país, tanto en pesos colombianos como en dólares, junto con su caudal de diseño. Dada esta información se realiza el ejercicio de estimación de la curva de costos marginales de construcción con esta pequeña muestra, que, si bien no logra ser representativa, permite observar la aplicación de la metodología para estimar la curva en futuro cuando exista un mejor nivel de registro de la variable costos de construcción.

Dados los datos de costos de construcción por habitante en pesos colombianos y en dólares y los datos de caudal de diseño se procede a tomar logaritmo de las variables. En la Tabla 67 se presenta la estadística descriptiva de las variables en valor normal y en logaritmo.

¹³⁶ Test de Shapiro–Wilk se usa para contrastar la normalidad de un conjunto de datos. Se plantea como hipótesis nula que una muestra x_1, \dots, x_n proviene de una población normalmente distribuida. Se considera uno de los test más potentes para el contraste de normalidad, sobre todo para muestras pequeñas ($n < 50$).

¹³⁷ El test de Jarque-Bera es una prueba de bondad de ajuste para comprobar si una muestra de datos tiene la asimetría y la curtosis de una distribución normal. El estadístico de Jarque-Bera se distribuye asintóticamente como una distribución chi cuadrado con dos grados de libertad y puede usarse para probar la hipótesis nula de que los datos pertenecen a una distribución normal. La hipótesis nula es una hipótesis conjunta de que la asimetría y el exceso de curtosis son nulos (asimetría = 0 y curtosis = 3).

¹³⁸ El test de Goldfeld-Quandt comprueba la homocedasticidad en análisis de regresión. Para ello divide un conjunto de datos en dos partes o grupos, y por lo tanto la prueba a veces se llama una prueba de dos grupos.

¹³⁹ El factor de inflación de la varianza (FIV, a veces también conocido por su nombre en inglés, variance inflation factor, y de ahí VIF) cuantifica la intensidad de la multicolinealidad en un análisis de regresión normal de mínimos cuadrados. Proporciona un índice que mide hasta qué punto la varianza (el cuadrado de la desviación estándar estimada) de un coeficiente de regresión estimado se incrementa a causa de la colinealidad.

¹⁴⁰ Los supuestos clásicos del modelo de regresión lineal para datos de corte transversal son: normalidad en el término de error, varianza homoscedástica y no multicolinealidad entre las variables explicativas.

Tabla 67. Estadística descriptiva de la muestra de PTAR

	Costo en \$ por habitante	Logaritmo del costo en \$ por habitante	Costo en USD por habitante	Logaritmo del costo en USD por habitante	Caudal de diseño (m ³ /s)	Logaritmo del caudal de diseño (m ³ /s)
Mínimo	3000	8.006	1.00	0.000	0.120	-2.120
Primer cuartil	50527	10.827	21.00	3.041	0.300	-1.204
Mediana	68553	11.135	28.50	3.350	1.400	0.326
Promedio	135120	11.253	56.38	3.461	2.091	-0.004
Tercer cuartil	168224	12.032	70.00	4.247	3.625	1.269
Máximo	551854	13.221	231.00	5.442	8.000	2.079

Fuente: (Departamento Nacional de Planeación DNP, n.d.). Elaboración y cálculos propios

Se encuentra que, a pesar del pequeño tamaño de la muestra, hay una importante diversidad, dada la amplitud tanto del rango como del rango intercuartil de las variables, posiblemente relacionado con el tipo de tratamiento, razón por la cual, como ya se mencionó en la metodología se debe tomar en cuenta al momento de estimar la función de costo marginal de construcción.

Luego se procede con la estimación de la correlación entre las variables explicativas y la variable dependiente. Se debe recordar que el coeficiente de correlación es una medida de asociación lineal, más no de determinación, pero es el primer estadístico que puede indicar si es posible o no una relación de dependencia entre las variables. Al hacer el cálculo se encuentra que la correlación entre el logaritmo del costo de construcción por habitante en pesos colombianos y el logaritmo del caudal de diseño es de 0,16, indicando una asociación lineal positiva débil entre estas variables (ya que su valor es positivo), mientras que la correlación del logaritmo de costo de construcción por habitante en dólares y el logaritmo del caudal de diseño es de 0,156, indicando una asociación lineal positiva débil entre las variables.

Ahora se continua con la estimación de la función de costo de construcción, para lo cual se corre la regresión propuesta en la metodología de dos formas: una primera forma utilizando como variable explicativa el logaritmo del costo de construcción en pesos colombianos, y una segunda forma utilizando como variable explicativa el logaritmo del costo de construcción en dólares. Ambos modelos arrojan como parámetros estadísticamente significativos la constante y la pendiente asociada a la *dummy* de tipo de tratamiento preliminar. Se elige trabajar con el modelo en dólares ya que su R² ajustado es un poco más alto, lo que era de esperar dado que el rango del costo en dólares es menor que el rango del costo en pesos.

Se corre nuevamente la regresión del modelo en dólares sin tener en cuenta a las *dummy* de tipo de tratamiento primario y secundario ya que no son estadísticamente significativas. Se mantiene la variable de caudal de diseño a pesar de no ser estadísticamente significativa, ya que es la variable de interés y permite desarrollar el resto del ejercicio de estimación. El modelo de costo de construcción estimado se presenta en la Tabla 68.

Tabla 68. Estimación Función de Costo de Construcción PTAR por Habitante

Modelo de costo de construcción por habitante de PTAR			
Parámetro	Estimación	P-valor	R2 ajustado
Constante	3,6996	2,03E-14	0,2634
Pendiente respecto a CD	0,1555	0,32453	
Pendiente respecto a preliminar	-2,0599	0,00417	

Fuente: Elaboración y cálculos propios

Se puede ver que por un aumento de 1% en el caudal de diseño de la PTAR se espera un aumento de 0,15% del costo de construcción por habitante, y si se construye una PTAR con tipo de tratamiento preliminar en lugar de una PTAR con tipo de tratamiento primario o secundario se espera una reducción del costo de construcción por habitante del 2,06%. Además, según el R² ajustado, variaciones en el caudal de diseño y el tipo de tratamiento explican el 26,34% de las variaciones del costo de construcción por habitante.

En este punto se somete el modelo estimado a pruebas de validación de los supuestos del modelo clásico de regresión lineal, encontrando normalidad en el término de error¹⁴¹, varianza es homoscedástica¹⁴² y que no hay presencia de multicolinealidad¹⁴³, por lo tanto, cumple los supuestos del modelo clásico de regresión lineal y es un modelo adecuado. Se puede expresar esta función de costo de construcción por habitante como (Ecuación 17):

Ecuación 17. Función de costo de construcción por habitante estimada

$$\log(CH)_i = 3.6996 + 0.1555 \log(CD)_i - 2.0599 \text{preliminar}$$

En este punto se puede diferenciar dos funciones de costo de construcción, una para PTAR con tipo de tratamiento preliminar y otra para PTAR con tipo de tratamiento primario y secundario. En el caso de sistemas de tratamiento preliminares la función de costo de construcción es (Ecuación 18):

Ecuación 18. Función de costo de construcción por habitante para tipo de tratamiento preliminar estimada

$$\log(CH)_{\text{prel}} = 3.6996 + 0.1555 \log(CD)_{\text{prel}} - 2.0599(1)$$

$$\log(CH)_{\text{prel}} = 1.6397 + 0.1555 \log(CD)_{\text{prel}}$$

$$CH_{\text{prel}} = 5.153623 * CD_{\text{prel}}^{0.1555}$$

Donde:

- CH_{prel} : Costo en USD por habitante para PTAR con tipo de tratamiento preliminar
- CD_{prel} : Caudal de diseño (m³/s) de las PTAR con tipo de tratamiento preliminar

¹⁴¹ Normalidad en el término de error: Se refiere que el término de error del modelo sigue una distribución aproximadamente normal.

¹⁴² Varianza homoscedástica: Varianza de los errores es constante.

¹⁴³ No multicolinealidad: No hay relaciones lineales entre las variables explicativas del modelo.

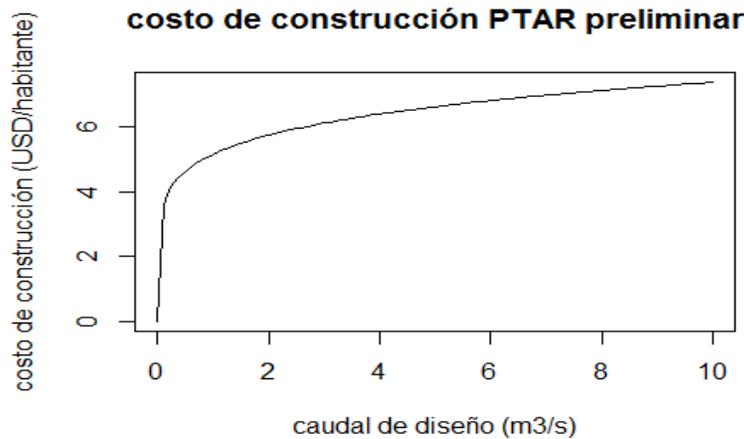


Figura 53. Función de costo de construcción para tipo de tratamiento preliminar
Fuente: Elaboración y cálculos propios

Mientras que la función de costo de construcción para sistemas primarios y secundario es (Ecuación 19):

Ecuación 19. Función de costo de construcción por habitante para tipo de tratamiento primario y secundario estimada

$$\log(CH)_{ps} = 3.6996 + 0.1555 \log(CD)_{ps} - 2.0599(0)$$

$$\log(CH)_{ps} = 3.6996 + 0.1555 \log(CD)_{ps}$$

$$CH_{ps} = 40.43113 * CD_{ps}^{0.1555}$$

Donde:

- CH_{ps} : Costo en USD por habitante para PTAR con tipo de tratamiento primario o secundario
- CD_{ps} : Caudal de diseño (m^3/s) de las PTAR con tipo de tratamiento primario o secundario

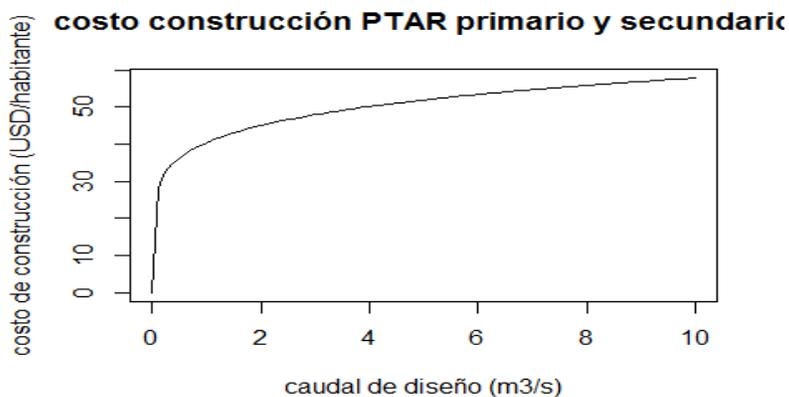


Figura 54. Función de costo de construcción para tipo de tratamiento primario y secundario
Fuente: Elaboración y cálculos propios

Como se observa, las funciones de costo de construcción son crecientes a tasas decrecientes, gracias a que la elasticidad del costo del caudal de diseño (0,15) está en el intervalo (0,1), es decir que, para las PTAR en estudio, se comprueba la existencia de economías de escala y se espera que a medida que aumenta el caudal de diseño de las PTAR disminuya el costo marginal de construcción por habitante.

Al evaluar (por medio de la derivada) el cambio de la variable costo por habitante con respecto al caudal de diseño, se obtiene las funciones de costo marginal de construcción como se muestra en la Ecuación 20 y la Ecuación 21.

Ecuación 20. Función de costo marginal de construcción para tipo de tratamiento preliminar estimada

$$cmg_{prel} = 5.955011 * CD_{prel}^{-0.8445}$$

Donde:

- cmg_{prel} : Costo marginal de construcción en USD por habitante en PTAR con tipo de tratamiento preliminar
- CD_{prel} : Caudal de diseño (m³/s) de las PTAR con tipo de tratamiento preliminar

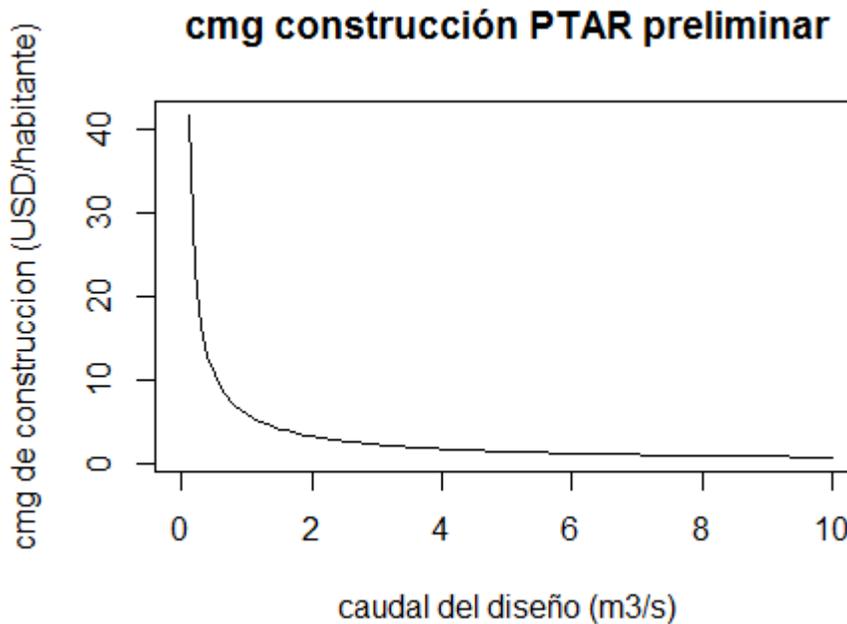


Figura 55. Costo marginal de construcción tipo de tratamiento preliminar

Fuente: Elaboración y cálculos propios

Ecuación 21. Función de costo marginal de construcción para tipo de tratamiento primario y secundario estimada

$$cmg_{ps} = 46.71817 * CD_{ps}^{-0.8445}$$

- cmg_{ps} : Costo marginal de construcción en USD por habitante en PTAR con tipo de tratamiento primario o secundario
- CD_{ps} : Caudal de diseño (m³/s) de las PTAR con tipo de tratamiento primario o secundario

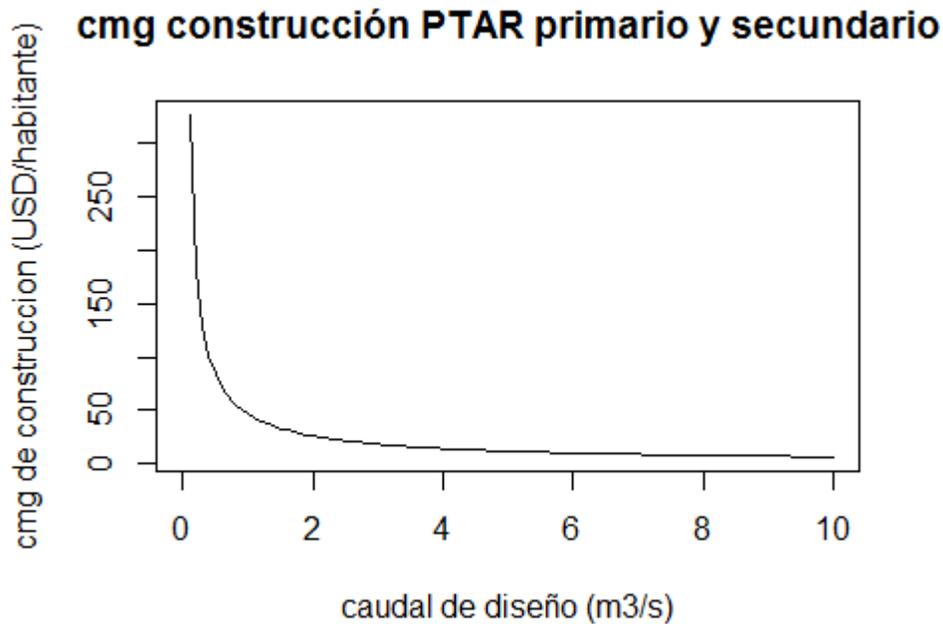


Figura 56. Costo marginal de construcción tipo de tratamiento primario y secundario
Elaboración y cálculos propios

Las funciones de costo marginal de construcción son decrecientes y comprueban la existencia de economías de escala ya mencionada. Claramente el nivel de la curva de costo marginal de construcción de PTAR con tipo de tratamiento preliminar es inferior a nivel de la curva de costo marginal de construcción de PTAR con tipo de tratamiento primario y secundario, ya que entre más avanzada sea el tipo de tratamiento más costosa será la construcción.

11.3 Observaciones finales sobre los costos marginales de construcción de las PTAR en Colombia

Dado que, el tamaño de muestra con el que se trabajó es pequeño, no es posible arrojar conclusiones a nivel general sobre el comportamiento de los costos de construcción de las PTAR en Colombia. El desarrollo del presente modelo se realizó pensando más en presentar una metodología aplicable a futuro, para lo cual se requiere un sistema de información unificado de las PTAR en Colombia que contemple a la variable costos de construcción, idealmente desagregada en conceptos como estudios y diseños, terrenos, infraestructura, entre otros, a fin de poder modelar el comportamiento de estos costos de una manera más detalla.

Es posible hablar del comportamiento de los costos de las 26 PTAR estudiadas, para las cuales se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre la función de costos para tipo de tratamiento preliminar y tipo de tratamiento primario y secundario, esto es posible ya que en la muestra tanto como en Colombia la gran mayoría de PTAR tienen tipo de tratamiento secundario lo que hace difícil que el modelo pueda capturar las diferencias entre los tipos de tratamiento primario y secundario.

Claramente el costo de construcción autónomo, el cual está representado por la constante del modelo, es mayor para el tipo de tratamiento primario y secundario que para el tipo de tratamiento preliminar,

ya que los primeros son tratamientos más eficientes pero que requieren de un mayor esfuerzo financiero.

Definidos los objetivos del país en cuanto a tratamiento de aguas residuales, se espera que continúe avanzando hacia plantas de tratamiento con tecnologías más avanzadas, que si bien, son más costosas dada su eficiencia, en una evaluación costo beneficio seguramente obtendrán mejores resultados.

El parámetro de elasticidad del costo del caudal de diseño no fue estadísticamente significativo, es decir, que para esta muestra de 26 PTAR, la caudal de diseño no determina los costos de construcción, aun así, el procedimiento de estimación se desarrolló bajo el supuesto de que esta elasticidad era estadísticamente significativa, ya que más allá de querer encontrar el parámetro exacto, lo que se buscaba es poner a disposición una metodología de estimación que sea reproducible en el futuro.

Suponiendo que el parámetro de elasticidad costo de la caudal de diseño fuera estadísticamente significativo se puede decir para estas 26 PTAR, que por un aumento de 1% en la caudal de diseño se espera un aumento de 0,15% en los costos de construcción por habitante. Esto representa a las economías de escala presentes en esta producción y es un buen indicio de la conveniencia de construir PTAR de mayor tamaño. Esto bajo un criterio económico, que debe ser contrastado con otros criterios como el de eficiencia de remoción, impacto ambiental, impacto social, entre otros, para determinar el tamaño de PTAR más conveniente para cada comunidad.

12 EFECTO DE LAS VARIACIONES DE LA TASA RETRIBUTIVA POR VERTIMIENTOS SOBRE LAS CARGAS CONTAMINANTES EN COLOMBIA 2010-2015

La Tasa Retributiva por vertimientos puntuales (TR) es un instrumento económico de política ambiental, el cual realiza un cobro tarifario a los usuarios que generen vertimiento de cargas contaminantes. La TR tiene dos objetivos fundamentales, el primero es incentivar a través del cobro, para que los usuarios de vertimientos disminuyan las cargas contaminantes que descargan en los cuerpos de agua, y el segundo es generar recurso financiero para ser invertido en la recuperación ambiental de los cuerpos de agua. Para que se cumpla este doble efecto, se requieren al menos dos condiciones complementarias: primero, que el cobro sea proporcional a la magnitud de uso del recurso natural; y segundo, que las tarifas se fijen a un nivel que efectivamente induzca al usuario a un uso más eficiente del recurso (Rudas, 2008).

En Colombia, la TR se cobra específicamente para dos tipos de contaminantes: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), y Sólidos Suspendidos Totales (SST), y es recaudada en cada región por la correspondiente Autoridad Ambiental (AA), quien es la encargada también de la inversión de los recursos obtenidos por concepto de la TR.

Para su cálculo diferenciado se tiene en cuenta dos variables, la primera es una tarifa mínima establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) año a año, y la segunda, un factor regional, el cual es un factor que incide en la determinación de la tasa retributiva y está compuesto por un coeficiente de incremento de la tarifa mínima que involucra los costos sociales y ambientales de los daños causados por los vertimientos al valor de la tarifa de la tasa (MADS, 2004b). De este modo la TR presenta variaciones entre los tipos de usuarios y durante el tiempo.

Dado lo anterior, el objetivo de este numeral es determinar si la TR tanto en el caso de la DBO como en los SST, ha sido un incentivo para que los usuarios reduzcan las cargas contaminantes en los puntos de vertimiento. Para ello se propone un acercamiento al comportamiento de la TR y las variables asociadas a su cálculo para el periodo 2010-2015, por medio de un análisis de estadística descriptiva a nivel nacional. Luego se presenta un modelo econométrico de panel de datos en el cual es posible incorporar la variación de la TR y las cargas contaminantes entre usuarios y a través del tiempo. El documento está dividido en dos secciones: metodología y el análisis de resultados.

12.1 Metodología

Se logró obtener los reportes de seguimiento a la TR por jurisdicción, para 34 CAR, por parte del economista Guillermo Rudas en reunión con el Departamento Nacional de Planeación (DNP), las cuales cuentan con 24.084 registros. A partir de estas bases de datos, el equipo técnico construye una base de datos unificada para todas las CAR extrayendo la información del periodo 2010-2015 de las siguientes variables:

- **Factor regional:** Es un factor que incide en la determinación de la tasa retributiva y está compuesto por un coeficiente de incremento de la tarifa mínima que involucra los costos sociales y ambientales de los daños causados por los vertimientos al valor de la tarifa de la tasa (MADS, 2004b).

- **Número de usuarios:** Número de personas, empresas, u organizaciones que realizan vertimientos sobre la fuente hídrica y están registrados por la CAR por lo que son objeto de cobro de TR al año.
- **Caudal vertido:** Volumen de vertimientos por unidad de tiempo, en este caso la unidad de tiempo es anual, esta variable se mide en metros cúbicos (millones de $m^3/año$)
- **Carga línea base:** Carga contaminante vertida al cuerpo de agua por el usuario al inicio del quinquenio (millones de $kg/año$).
- **Carga esperada al final del quinquenio:** Límite del vertimiento de sustancia contaminante, representa la meta de reducción de vertimiento (millones de $kg/año$).
- **Carga actual:** Vertimiento de sustancia contaminante (millones de $kg/año$).
- **Facturación:** Valor a pagar por vertimiento. En este caso se calcula para vertimientos de DBO, SST y la suma de ambas (millones de $\$/año$).
- **Recaudo:** Valor pagado por los usuarios (millones de $\$/año$).

Además, se construyen las siguientes variables:

- **Déficit de recaudo:** Diferencia entre el valor facturado y el valor recaudado ($\$/año$).
- **Tasa de recaudo:** Cociente entre el valor recaudado y el valor facturado.
- **Tasa retributiva por vertimiento:** Es el producto de la Tarifa Mínima año establecida por MADS para cada contaminante y su respectivo factor regional ($\$$)¹⁴⁴.

Se toman las medidas de vertimientos, cargas contaminantes, facturación y recaudo en millones a fin de trabajar con una escala más adecuada.

En cuanto a la construcción del modelo econométrico, como ya se mencionó en la introducción, el objetivo es estimar el impacto que tiene la TR sobre los niveles de carga contaminante de DBO y SST. Para ello es adecuado proponer un análisis de variaciones porcentuales, es decir, estimar cómo las variaciones de la TR explican las variaciones de las cargas de DBO y SST.

12.2 Análisis de datos

Se desarrolla un análisis de estadística descriptiva donde se observa el comportamiento y relación conjunta de las variables, en medidas promedio por medio de gráficas de serie de tiempo. Se toma la decisión de trabajar con medidas promedio y no con medidas totales a causa del déficit de información que será expuesto más adelante. Para el caso de las cargas contaminantes y la TR se hacen cálculos de coeficiente de correlación. También se presenta los vertimientos de cargas contaminantes por actividad económica.

En cuanto el modelo econométrico, dado que este pretende estimar variaciones porcentuales, se debe correr dos regresiones, una primera donde la variable dependiente será el logaritmo de la media del nivel de vertimientos DBO del municipio i en el momento t ($carga_DBO_{it}$) y la variable explicativa será el logaritmo de la media de la TR aplicada en el municipio i en el momento t (tr_DBO_{it}). Una segunda regresión donde la variable dependiente será el logaritmo de la media del nivel de vertimientos de SST

¹⁴⁴ La información sobre tarifa mínima fue tomada directamente la página web del MADS.

del municipio i en el momento t ($carga_SST_{it}$) y la variable explicativa será el logaritmo de la media de la TR aplicada en el municipio i en el momento t (tr_SST_{it}).

Al analizar los datos se encuentra que es necesario construir la TR, ya que no se encuentra especificada, para ello se calcula la TR como el producto del factor regional aplicado al usuario i en el momento t (fr_{it}) y la tarifa mínima establecida por el gobierno para el periodo t (tm_t), luego se toma la media municipal de la TR_DBO y la TR_SST calculadas (Ecuación 22).

Ecuación 22. Tasa retributiva

$$tr_{it} = fr_{it} * tm_t$$

De este modo los modelos que se deberían estimar son (Ecuación 23 y Ecuación 24):

Ecuación 23. Modelo 1

$$\log(carga_DBO_{it}) = a + \beta_1 \log(tr_DBO_{it}) + u_{it}$$

Ecuación 24. Modelo 2

$$\log(carga_SST_{it}) = a + \beta_1 \log(tr_SST_{it}) + u_{it}$$

Sin embargo, existe el problema que hay una muy importante cantidad de datos faltantes de las variables de interés en los dos paneles, razón por la cual se deben tomar dos medidas de ajuste a fin de no enfrentar unos paneles de datos altamente desbalanceados. La primera es eliminar del panel asociado a la DBO, los registros sin información del nivel de vertimiento de DBO, y eliminar del panel de datos asociado a los SST los registros sin información de nivel de vertimiento de SST.

La segunda, es que, dado la gran cantidad de datos faltantes, tanto a nivel de municipios como a nivel de CAR ocurre que no hay registro de todos los años correspondientes al periodo 2010-2015, y se considera importante construir variables *dummy* car_{it} , tal que tomen el valor de 0 si el dato corresponde a la CAR i en el momento t y que tomen valor de cero en otro caso, a fin de tener en cuenta la posibles diferencias de las cargas DBO y SST explicadas por la CAR. De este modo los modelos a estimar son (Ecuación 25 y Ecuación 26):

Ecuación 25. Modelo 3

$$\log(carga_DBO_{it}) = a + \beta_1 \log(tr_DBO_{it}) + \delta_1 car1_{it} + \delta_2 car2_{it} + \dots + \delta_n carn_{it} + u_{it}$$

Ecuación 26. Modelo 4

$$\log(carga_SST_{it}) = a + \beta_1 \log(tr_SST_{it}) + \delta_2 car1_{it} + \delta_3 car2_{it} + \dots + \delta_n carn_{it} + u_{it}$$

Suponiendo que las variables explicativas son exógenas, podemos plantear un panel estático, con tres posibles estimaciones. La primera es un modelo pooling OLS el cual no toma en cuenta la estructura de panel de datos y hace una estimación por mínimos cuadrados suponiendo datos de corte transversal.

La segunda es una estimación de efectos fijos individuales, la cual contempla la posibilidad que características invariantes en el tiempo, pero que varían entre individuos, provoquen que el fenómeno no se pueda estandarizar en una sola forma funcional, por lo que estima interceptos diferentes para cada individuo (para cada municipio en este caso) y una pendiente común, generando N modelos diferentes. La estimación del modelo de Efectos Fijos se hace por medio de la metodología *Within* que consiste en un modelo de desviaciones de la media.

La tercera estimación es efectos aleatorios, la cual al contrario que efectos fijos, contempla que las características invariantes en el tiempo, pero que varían entre individuos, se pueden estandarizar en una sola forma funcional, por lo que calculan un intercepto medio para todos los individuos (para cada municipio en este caso) y una pendiente común como lo hace efectos fijos, generando así un solo modelo. Para elegir cuál de los tres modelos es el más adecuado, se someten a pruebas de hipótesis comparativas como se muestra en la Ecuación 27. De los resultados de estas pruebas de hipótesis se determina finalmente que modelo será utilizado.

Ecuación 27. Pruebas de hipótesis para selección de modelos de datos panel

Prueba 1: Breusch-Pagan test¹⁴⁵

$$H_0: \text{Pooling OLS es adecuado}^{146}$$
$$H_1: \text{Pooling OLS no es adecuado}^{147}$$

Si resulta que el modelo pooling¹⁴⁸ no es adecuado se aplica la prueba 2

Prueba 2: Hausman test¹⁴⁹

$$H_0: \text{Efectos aleatorios es más adecuado}$$
$$H_1: \text{Efectos fijos es más adecuado}$$

12.3 Análisis de información faltante

Aunque se cuenta con una gran fuente de información, se encontraron varios problemas para el análisis de datos, el primer problema tiene que ver con que algunas CAR, no reportan la información en el formato solicitado por el MADS, por lo que se debía adaptar¹⁵⁰ sus reportes a este formato para poder agregar la información, y para el caso específico de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPOMAG), su formato tan solo proveía información de facturación y recaudo.

El segundo problema tiene que ver con la continuidad de la información a través del tiempo. Se encontró para varias CAR que no contaban con todos los reportes anuales del periodo 2010-2015. El tercer problema tiene que ver con la continuidad de la información a través de usuarios y de variables. Se encontró para todas las CAR espacios vacíos, incluso columnas completas de variables clasificadas por usuarios sin información. En total faltan 167.553 datos, que equivalen al 32,62% de la información. En la Tabla 69 se presentan los años sin información de cada CAR y en la Tabla 70 se presenta el número de datos faltantes por variable.

¹⁴⁵ El test de Breusch-Pagan se utiliza para determinar la heterocedasticidad en un modelo de regresión lineal. Analiza si la varianza estimada de los residuos de una regresión dependen de los valores de las variables independientes.

¹⁴⁶ H_0 : Hipótesis nula

¹⁴⁷ H_1 : Hipótesis alternativa

¹⁴⁸ Modelo donde todos los coeficientes son constantes en el tiempo y para todos los individuos.

¹⁴⁹ Hausman test: El test propuesto por Hausman (1978) es un test chi cuadrado que determina si las diferencias son sistemáticas y significativas entre dos estimaciones. Se emplea fundamentalmente para dos cosas: a) saber si un estimador es consistente. b) saber si una variable es o no relevante.

¹⁵⁰ La adaptación consiste en tomar las variables en común que tengan ambos formatos

Tabla 69. Años sin reportar CAR 2010-2015

CAR	Años sin reporte de información
CARSUCRE	2013, 2014, 2015
CAS	2012
CDA	2011
CORALINA	2013, 2014, 2015
CORANTIOQUIA	2010
CORPOBOYACA	2010
CORPOCALDAS	2011
CORPOCESAR	2012
CORPOGUAJIRA	2014
CORPONARIÑO	2011
CORPORINOQUIA	2011
CORPOURABA	2012
CRQ	2011, 2012, 2013
CRC	2010, 2011, 2012, 2015
CVC	2012
CVS	2012

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

Tabla 70. Total CAR. Datos faltantes por variable 2010-2015

Variable	Número de registros faltantes
Cuenca y tramo	1.636
Nombre usuario	39
Municipio donde el usuario realiza el vertimiento	555
Código del sector económico al que pertenece (CIU Revisión 3)	6.881
Tipo de meta de reducción	7.521
Tipo de autorización	14.189
Factor regional DBO vigente	1.873
Factor regional SST vigente	1.920
Caudal vertido (m ³ /año)	11.572
Carga de DBO5 de línea base (kg/año) (Calculada bajo el Decreto 3100/03)	9.407
Carga de DBO5 esperada al final del quinquenio (kg/año)	9.840
Carga actual de DBO5 (kg/año calendario)	734
Carga de SST de línea base (kg/año)	9.316
Carga de SST esperada al final del quinquenio (kg/año)	9.385
Carga actual de SST (kg/año calendario)	605
Facturación DBO5	788

Variable	Número de registros faltantes
Facturación SST	796
Facturación total	88
Recaudo total (DBO5 + SST)	9.413
Valor acuerdos de pago	23.820
Duración del acuerdo de pago y fecha de inicio	24.060
Valor cobros coactivos	23.095

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

12.4 Análisis de resultados

12.4.1 COMPORTAMIENTO NACIONAL 2010-2015

Para obtener los resultados a nivel nacional, fue necesario agregar la información disponible de las diferentes CAR del país, pero dadas las restricciones por registro ya mencionadas, se encontró que no todas las CAR reportaron información en todos los años, o que no reportaron todas las variables necesarias, o incluso que no utilizaron el formato de reporte sugerido por MADS, esto hace que para poder presentar resultados que sean objeto de comparaciones entre años, se tomen para Colombia las variables promedio y no las variables totales, promediando cada año para cada CAR y luego para cada año se promedia los resultados de todas las CAR, utilizando una media ponderada, donde la variable ponderadora está dada por el número de usuarios de cada CAR en cada año. A continuación, se presentan los siguientes resultados.

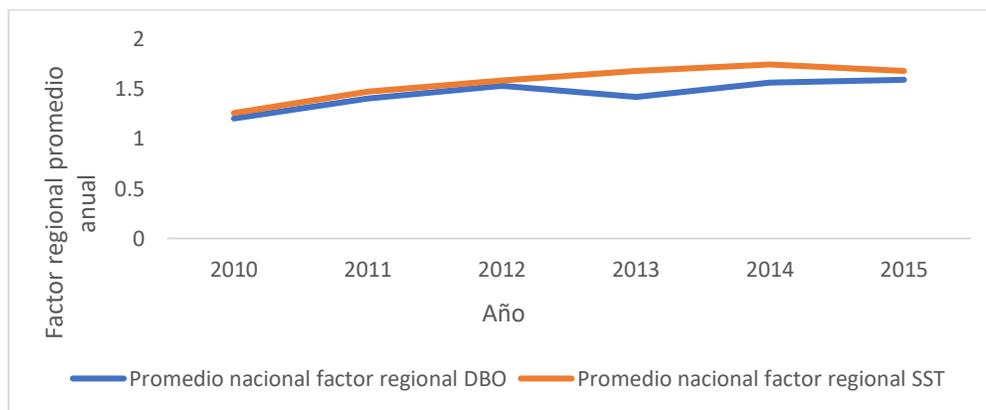


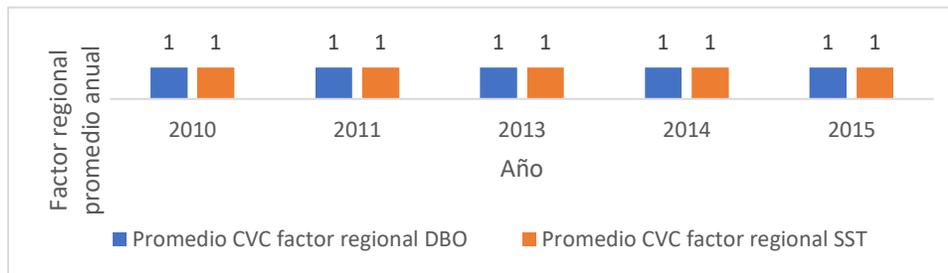
Figura 57. Colombia. Factor regional promedio anual DBO vs SST 2010-2015

Fuente: MADS. Elaboración y cálculos propios

En la Figura 57 se puede observar que el promedio del factor regional utilizado por las CAR para sus usuarios tiene una tendencia creciente siendo siempre levemente superior, el factor regional promedio asociado a los SST, que el factor regional promedio asociado a la DBO. El factor regional promedio DBO presentó un crecimiento del 32% pasando de 1,20 en 2010 a 1,59 en 2015, mientras que el factor regional promedio SST presentó un crecimiento del 33% pasando de 1,25 en 2010 a 1,67 en 2015. Aun así, se presentan casos de CAR que no realizan la actualización de los factores regionales que cobran, un ejemplo de ello se presenta en la Corporación Autónoma Regional del Valle de Cauca (CVC), tal como se muestra en el .

Cuadro 22. CVC Factor regional promedio constante e igual a 1.

Para el periodo 2010-2015 en varias CAR se presentó el caso que para todo un año se calculaba el valor de la TR para todos los usuarios con el mismo factor regional, en muchos casos este factor promedio era igual a 1, por lo que la TR cobrada era equivalente a la tarifa mínima. Esto es un problema ya que un factor regional constante entre individuos no está reflejando las diferencias de los costos sociales y ambientales que genera cada usuario, y un factor regional constante en el tiempo significa o que todos los usuarios están cumpliendo las metas de reducción de vertimientos o que la CAR no está logrando hacer un seguimiento adecuado de los puntos de vertimiento para verificar el cumplimiento de las metas. Un caso extremo se presentó en la CVC que según sus reportes utilizó como factor regional para todos sus usuarios en todos los años reportados el valor de 1, tal como se observa en la siguiente figura.



En cuanto a las cargas DBO y SST (Figura 58) la tendencia es aproximadamente constante durante todo el periodo, siendo superior la carga SST, excepto de un dato atípico de carga SST en 2013, superior a la tendencia y que se ve reflejado también en la facturación promedio SST de 2013, esto pudo ocurrir a causa del fenómeno del niño del año 2013 que redujo los caudales de las fuentes hídricas (Departamento Nacional de Planeación DNP, n.d.).

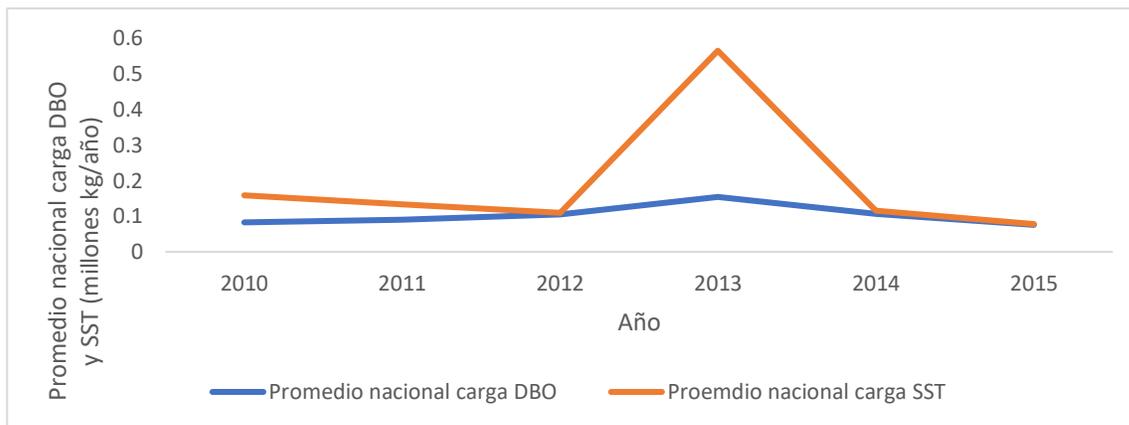


Figura 58. Colombia. Carga promedio anual DBO vs SST 2010-2015
Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

La facturación promedio DBO5 y SST (Figura 59) son crecientes entre 2010 y 2013, año a partir del cual inicia una tendencia decreciente. En cuanto a la facturación total y el recaudo, presentan tendencia

constante, excepto el dato atípico de 2013, ya mencionado para la carga SST. Entre 2010 y 2015 el recaudo equivale en promedio al 46,46% de la facturación total (Figura 60).

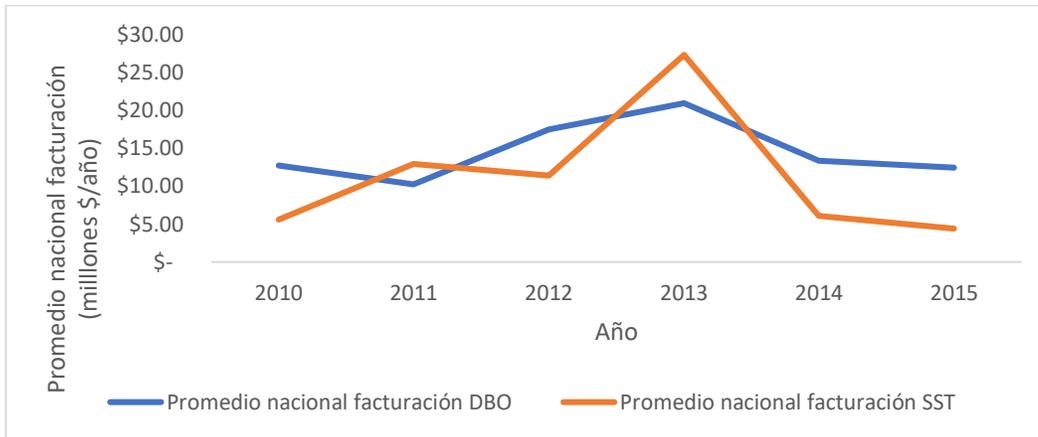


Figura 59. Colombia. Facturación promedio anual DBO vs SST 2010-2015

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

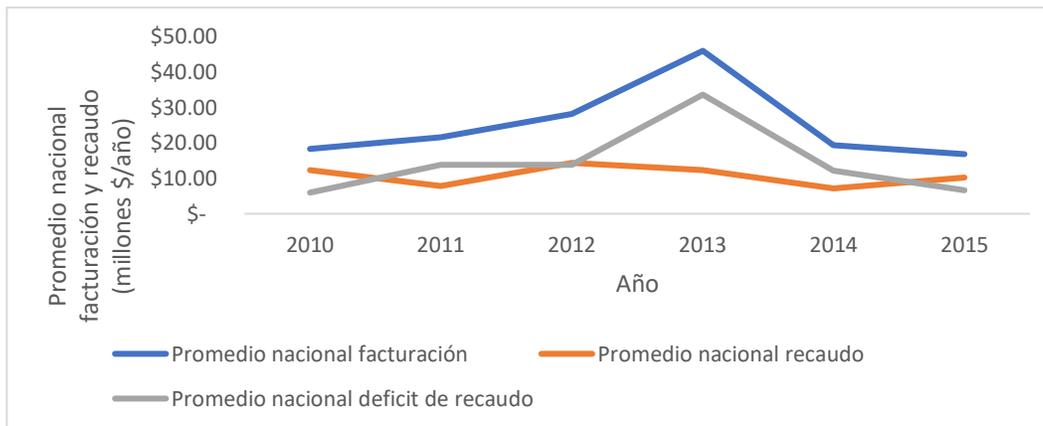


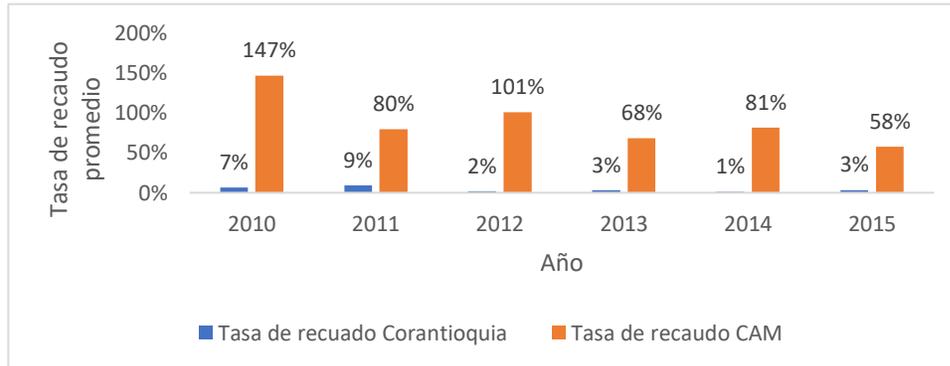
Figura 60. Colombia. Facturación promedio anual vs recaudo promedio anual 2010-2015

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

El tema del recaudo por concepto de la TR es fundamental para las CAR, ya que si bien el objetivo es que los usuarios reduzcan los vertimientos y con ello se reduzca la facturación, el recurso financiero generado por la TR tiene como destinación proyectos de recuperación ambiental de los cuerpos de agua. A nivel nacional podemos observar que el recaudo no logra el 50% de la facturación, lo cual representa una preocupación para el país en términos de dificultad para realizar la intervención y recuperación ambiental. En el se presentan dos casos sobre recaudo a nivel de CAR.

Cuadro 23. Dos casos sobre eficiencia en el recaudo de TR.

La Corporación Autónoma Regional de Antioquia (Corantioquia) y la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) presentan situaciones completamente diferentes con respecto a la eficiencia en el recaudo de la TR, que para este caso será entendida como el cociente entre la facturación y el recaudo. Mientras que la CAM presenta una buena eficiencia de recaudo en el periodo 2010-2015 (valores superiores al 50% del recaudo, destacándose 2010 y 2012 con tasas de recaudo superiores al 100%), Corantioquia presenta unos muy bajos niveles de recaudo con tasas inferiores al 10%. El resultado de la CAM puede deberse a una posible recuperación de cartera de años anteriores.



En cuanto a la relación entre carga promedio y TR, para el caso de DBO5 (Figura 61) se encontró un coeficiente de correlación de 0,0637, es decir, que existe una asociación lineal positiva débil entre las variables, mientras que para el caso de SST (Figura 62), el coeficiente de correlación es de 0,1348, lo que también indica una asociación lineal positiva débil entre las variables. Esto permite aproximarse a que no se logrará encontrar una influencia fuerte entre la TR y las cargas contaminantes DBO y SST en el desarrollo del modelo econométrico.

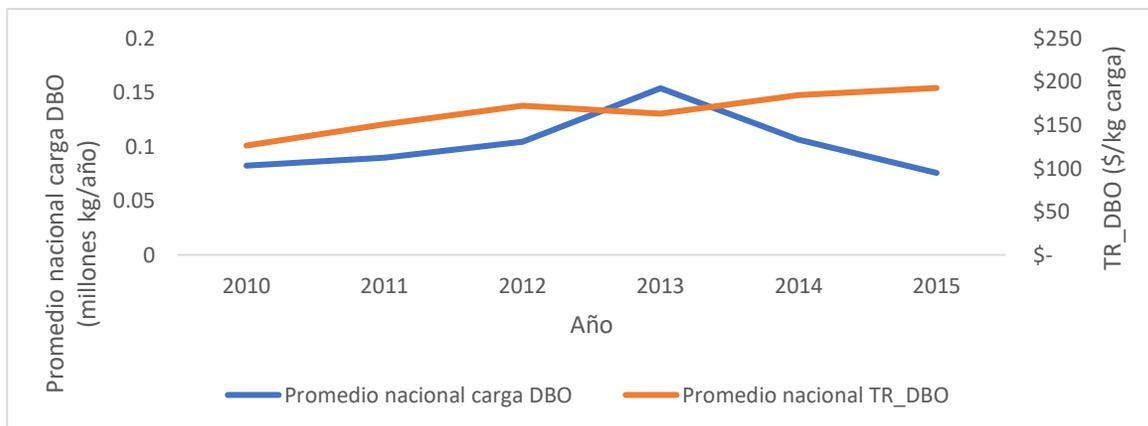


Figura 61. Colombia. Carga promedio vs TR promedio 2010-2015

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

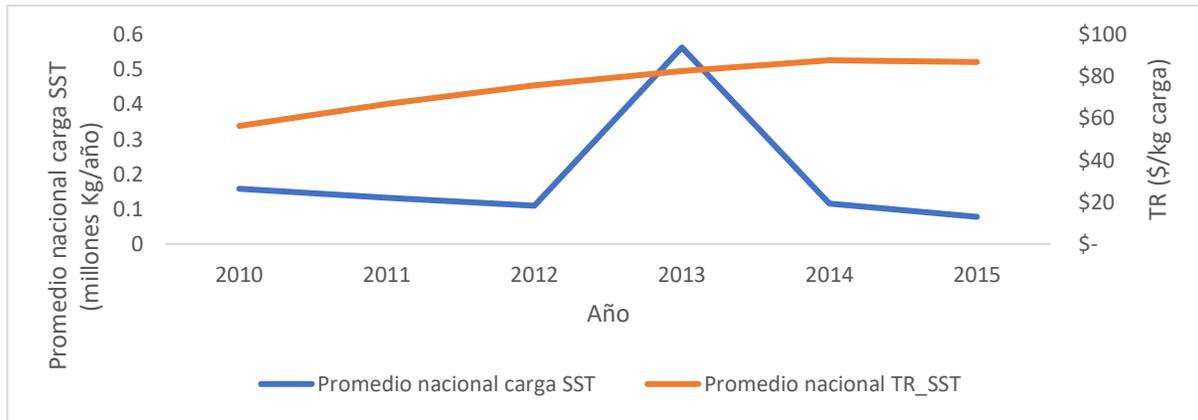


Figura 62. Colombia. Carga Actual Promedio SST vs TR 2010-2015

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

En las Figura 63 y Figura 64 se presentan las actividades económicas que en promedio generaron mayor carga contaminante en 2015. Para el caso de DBO, la actividad que mayor carga promedio generó fue la evaluación y tratamiento de aguas residuales, mientras que para el caso de SST, la actividad que generó mayor carga promedio fue la producción especializada de café. Es importante mencionar que esta información considera solo puntos de vertimientos formales, es decir, que están registrados por las CAR y que son objeto de cobro de la TR, pero que existe sin duda una gran cantidad de puntos de vertimientos no registrados por la CAR. Aun así las cifras conversan con los resultados obtenidos en el ENA 2014 (IDEAM, 2014a), donde se muestra una importante participación del café dentro de los vertimientos de DBO, SST y otros contaminantes.

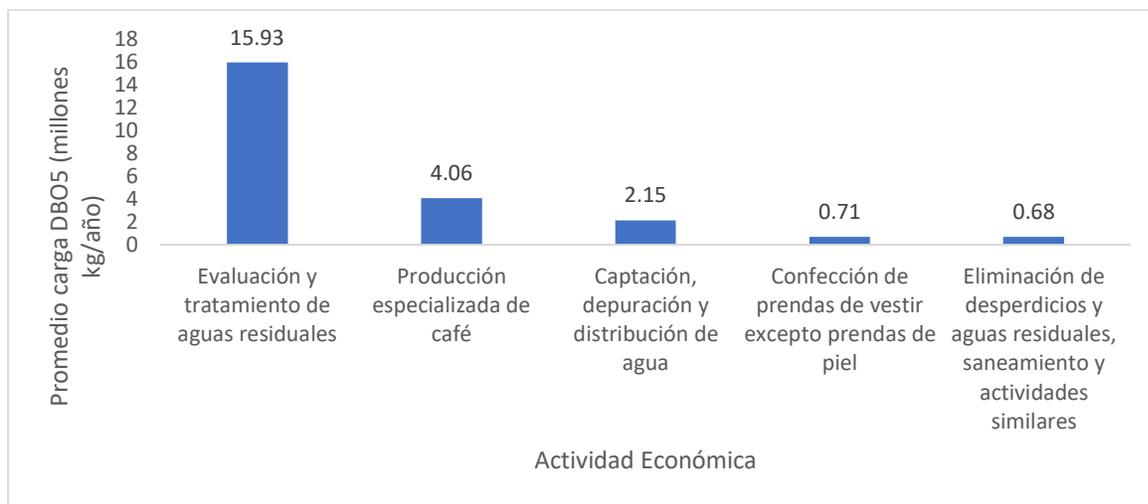


Figura 63. Colombia. Actividades Económicas con Mayor Promedio Carga DBO5 2015

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios



Figura 64. Colombia. Actividades Económicas con Mayor Promedio Carga SST 2015
Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

12.4.2 MODELO ECONOMÉTRICO

Al clasificar a los usuarios se logró una muestra de 911 municipios distribuidos en 28 CAR, para el periodo 2010-2015, pero dado que es un panel de datos desbalanceado, la muestra total es de 4.353 observaciones. En la Tabla 71 se presenta la estadística descriptiva del logaritmo de las principales variables de interés.

Tabla 71. Estadística Descriptiva

Estadística descriptiva logaritmo de las variables de interés				
Estadístico	log(Carga DBO)	log(Carga SST)	log(tr DBO)	log(tr SST)
Mínimo	0.2275	0.5668	3.971	3.213
Cuartil 1	9	9.1285	4.695	3.846
Mediana	10.1266	10.0768	4.775	3.926
Media	10.0715	10.0149	5.013	4.182
Cuartil 3	11.0307	10.9498	5.217	4.401
Máximo	15.5976	20.0157	6.516	5.666

Fuente: Elaboración y cálculos propios

El primer resultado importante que podemos inferir a partir de la tabla es que tanto el rango como el rango intercuartil en que se mueve el logaritmo del DBO es más amplio que el rango y el rango intercuartil en que se mueve el logaritmo de SST, esto ocurre gracias a que la tarifa mínima aplicada por MADs a las cargas DBO es superior a la tarifa mínima aplicada a las cargas SST, tal como lo muestra la Tabla 72. Es importante tener claro que la tarifa mínima se establece a partir de los costos de remoción de cada tipo de carga contaminante, es decir que el costo de remoción de DBO es más alto al costo de remoción de SST.

Tabla 72. Colombia. Tarifa Mínima TR 2010-2015

Año	DBO(\$/kg)	SST(\$/kg)	IPC Año Anterior
2010	106.05	45.35	2
2011	109.41	46.79	3.17
2012	113.49	48.53	3.73
2013	116.26	49.72	2.44
2014	118.52	50.68	1.94
2015	122.86	52.54	6.77

Fuente: Tomado de MinAmbiente

Recordando la Ecuación 25 y la Ecuación 26 presentadas en la metodología, los modelos a estimar son:

$$\begin{aligned} \log(\text{carga_DBO}_{it}) &= a + \beta_1 \log(\text{tr_DBO}_{it}) + \delta_1 \text{car1}_{it} + \delta_2 \text{car2}_{it} + \dots + \delta_n \text{carn}_{it} + u_{it} \\ \log(\text{carga_SST}_{it}) &= a + \beta_1 \log(\text{tr_SST}_{it}) + \delta_1 \text{car1}_{it} + \delta_2 \text{car2}_{it} + \dots + \delta_n \text{carn}_{it} + u_{it} \end{aligned}$$

Donde:

- carga_DBO_{it}: Media de la carga DBO generada por los usuarios del municipio i en el año t (millones kg/año)
- tr_DBO_{it}: Media de la TR por concepto de DBO aplicada a los usuarios del municipio i en el año t (\$)
- carga_SST_{it}: Media de la carga SST generada por los usuarios del municipio i en el año t (millones kg/año)
- tr_SST_{it}: Media de la TR por concepto SST aplicada a los usuarios del municipio i en el año t (\$)
- car_i: Conjunto de variables dummy que toman valor de 1 si el municipio pertenece a la CAR i y 0 en otro caso.

Antes de realizar la estimación de los modelos, se calcula el coeficiente de correlación entre log(carga_DBO₅) y el log(tr_DBO₅) encontrando que es de -0,053, lo que indica una asociación lineal negativa muy débil entre estas variables. Y el coeficiente de correlación entre log(carga_SST) y el log(tr_SST) es de -0,034, que también indica una asociación lineal muy débil entre estas variables.

Estos resultados son similares a los encontrados en el informe de estadística descriptiva donde se tomaron los valores absolutos de estas variables y no los logaritmos, pero con la diferencia que el signo del coeficiente de correlación entre las variables sin tomar logaritmo era positivo. Estos coeficientes de correlación permiten evidenciar que no se encontrará una relación fuerte entre los niveles de carga contaminante por DBO y SST y su respectiva TR. Esto se presenta porque el signo esperado es ambiguo, ya que las correlaciones son muy cercanas a cero y además la correlación en valores absolutos es positiva mientras que la correlación en logaritmos es negativa.

Una vez calculados los coeficientes de correlación se procede con la estimación de los modelos pooling OLS, efectos fijos y efectos aleatorios. Para DBO se encuentra que los tres modelos estiman coeficientes positivos de la relación entre la TR y las cargas DBO, lo que indica una relación directa entre estas variables, contrario a lo inferido en el coeficiente de correlación de logaritmos, donde se esperaba una relación negativa. Sin embargo, el coeficiente de correlación es muy cercano a cero lo que podría

justificar el cambio de signo. Los coeficientes estimados para relación entre las cargas DBO y su TR se presentan en la Tabla 73.

Tabla 73. Modelos estimados para TR DBO por tipo de estimación

Tipo de Estimación	Coeficiente Estimado TR_DBO	p valor	R2 del modelo
Pooling OLS	0.087211	0.090233	0.25692
Efectos Fijos (Within)	0.129442	0.001123	0.0030807
Efectos Aleatorios	0.1250277	0.0012162	0.21574

Fuente: Elaboración y cálculos propios

Al aplicar el Breusch Pagan test se encontró que una regresión pooling no es adecuada y al aplicar el test de Hausman se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los coeficientes estimados por efectos fijos y efectos aleatorios, por lo que es más adecuado el modelo de efectos fijos, a pesar de tener un R^2 bajo. Esto ocurre en parte gracias a que el modelo de efectos aleatorios presenta muchos más regresores que el modelo de efectos fijos. Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 74.

Tabla 74. Pruebas para selección de modelos TR DBO

Prueba	H ₀	H ₁	P-Valor
Breusch Pagan test	Pooling OLS es adecuado	Pooling OLS no es adecuado	<2.2e-16
Hausman test	Efectos aleatorios es más adecuado	Efectos fijos es más adecuado	1.058E-07

Fuente: Elaboración y cálculos propios

El modelo de efectos fijos estima entonces que por un aumento de 1% en la TR-DBO se espera un aumento de 0.129442% en los niveles de carga contaminantes DBO. Y que existen diferencias en los niveles de carga DBO autónoma en cada municipio ya que el modelo de efectos fijos estima un intercepto diferente para cada uno de ellos.

En el caso de SST, al estimar los modelos *pooling OLS*, efectos fijos y efectos aleatorios, se encuentra que los coeficientes asociados a la TR tienen signo positivo, igual que ocurrió con los modelos para DBO. Los coeficientes estimados indican una relación directa entre estas variables, mientras que el coeficiente de correlación indica una relación inversa. Esto es posible porque el coeficiente de correlación dio muy cercano a cero. En la Tabla 75 se presenta los coeficientes estimados de la relación entre las cargas SST y su TR.

Tabla 75. Modelos estimados para TR SST por tipo de estimación

Tipo de Estimación	Coeficiente Estimado TR_SST	p valor	R2 del modelo
Pooling OLS	0.185605	0.0003892	0.2079
Efectos Fijos (Within)	0.203003	2.519E-06	0.0097885
Efectos Aleatorios	0.198486	1.87E-06	0.19464

Fuente: Elaboración y cálculos propios

Al aplicar el Breusch Pagan test se encontró que una regresión *pooling* no es adecuada y al aplicar el test de Hausman se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los coeficientes

estimados por efectos fijos y efectos aleatorios, por lo que es más adecuado el modelo de efectos fijos, a pesar de su pequeño R^2 . Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 76.

Tabla 76. Pruebas para selección de modelos TR SST

Prueba	H_0	H_1	P-Valor
Breusch Pagan test	Pooling OLS es adecuado	Pooling OLS no es adecuado	<2.2e-16
Hausman test	Efectos aleatorios es más adecuado	Efectos fijos es más adecuado	1.19E-05

Fuente: Elaboración y cálculos propios

El modelo de efectos fijos estima entonces que por un aumento de 1% en la TR-SST se espera un aumento de 0.203003% en las cargas contaminantes SST. El R^2 de este modelo es de tan solo 0.0097885 lo que indica que la TR no logra explicar ni siquiera el 1% de las variaciones de las cargas SST.

Tanto para la DBO como para los SST el mejor modelo fue efectos fijos. En general los resultados muestran que la TR no está logrando su objetivo de ser incentivo a la reducción de cargas contaminantes dado el signo positivo de los coeficientes estimados, además también se puede decir que la TR no está explicando el comportamiento de las cargas contaminantes dado los R^2 bajos. Si bien los R^2 de los modelos aleatorios son más altos que los R^2 de los modelos de efectos fijos, esto ocurre gracias a que efectos aleatorios está tomando en cuenta los regresores por CAR mientras que efectos fijos no.

Este resultado es similar al encontrado por Galarza & Rudas (2009) quienes con un panel más pequeño (tres CAR) y un modelo de primeras diferencias también encontraron coeficientes positivos de la relación de la TR con los niveles DBO5 y SST, cuyos R^2 eran inferiores a 0,05, por lo que declararon sus resultados como no concluyentes. Entonces a pesar de las señales emitidas años atrás, aún no se ha logrado una estrategia para lograr que la TR sea más efectiva, lo que abre la pregunta de si es necesario un instrumento de Ley que modifique el funcionamiento y aplicación de la TR en el país.

El hecho que la TR no esté logrando el objetivo de ser un instrumento económico que incentive la reducción de cargas contaminantes vertidas a los cuerpos de agua puede estar explicada por varias hipótesis que requieren un estudio más amplio de la situación. Aun así, es adecuado ampliar en estas hipótesis a fin de direccionar el campo de investigación en este tema.

12.4.3 ANÁLISIS A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL MODELO

La TR se calcula en función de dos variables, la tarifa mínima establecida por MADS y el factor regional promedio que es calculado por cada CAR para cada tipo de sustancia contaminante y para cada cuerpo de agua o tramo del mismo (MADS, 2012). La tarifa mínima se calcula a partir del costo de remoción de la sustancia contaminante, mientras que el factor regional promedio se calcula como el daño marginal asociado a temas sociales, económicos, de salud, entre otros, causados por los vertimientos y el cumplimiento o no de las metas de reducción de vertimientos por parte de los usuarios.

En ese sentido, el cálculo de la tarifa mínima que está a cargo de MADS es más fácil que el cálculo del factor regional a cargo de las CAR, el cual debe ser diferenciado por cuerpo de agua o tramo del mismo, lo que implica una gran dificultad técnica para las CAR.

Las variaciones del factor regional están en función del cumplimiento de las metas de reducción de vertimientos contaminantes a los cuerpos de agua, pero si las CAR no pueden verificar el cumplimiento de estas metas con una periodicidad adecuada, o incluso ni siquiera las establecen, entonces en los casos donde no se actualice el factor regional por falta de información, las variaciones de la TR tan solo serán el reflejo del costo marginal de remoción y tratamiento de aguas y no del daño marginal causado por los vertimientos. Por lo que, si el costo marginal de remoción es bajo y por lo tanto la TR también, las empresas preferirán mantener o incluso aumentar los niveles de vertimientos y pagar la TR, que mejorar sus tecnologías de producción o al menos instalar Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) propias que posiblemente representen un costo mayor. Respecto a esto, MADS, MHCP, & COLCIENCIAS, (2013) establecieron que para 699 cuerpos de agua con vertimientos puntuales identificados hasta 2012, al 90% se le había establecido objetivo de calidad, el 68% tenía meta de reducción de carga y al 35% se le estaba haciendo evaluación del cumplimiento de metas

Otro problema importante que puede explicar el no funcionamiento de la TR, está relacionado con la gestión por parte de las CAR. Este es un problema de institucionalidad, porque se refiere a la capacidad de la CAR para ejercer su autoridad y aplicar sus instrumentos en su jurisdicción, lo que puede ocurrir especialmente en las CAR más pequeñas y de regiones más apartadas del país, aunque este fenómeno también se presenta en CAR grandes como Corantioquia (). Evidencia de este problema puede ser los bajos niveles de recaudo (Figura 60), donde para el periodo 2010-2015 el promedio de déficit de recaudo a nivel nacional fue de 53,53%. Es decir que más de la mitad de los recursos que deberían estar recibiendo las CAR por concepto de TR no están siendo pagados por los usuarios; con el agravante que quienes no pagan, tampoco reducen sus cargas contaminantes.

Además, se puede crear un círculo vicioso, ya que, si las CAR no reciben el recurso financiero esperado, seguirán perdiendo capacidad institucional en el sentido de que se les dificulta ejercer sus funciones de vigilancia y control sobre los cuerpos de agua, lo que está estrechamente relacionado con el problema de la no actualización periódica del factor regional.

Aun así, MADS et al. (2013) reconoce avances importantes en el tema institucional de las CAR, en cuanto a mejoras en la identificación de puntos de vertimientos puntuales, establecimiento de metas y evaluación de las mismas, pero reconociendo que aún se deje mejorar estos indicadores.

Relacionado también con la institucionalidad, existe el riesgo que la TR pase a ser un instrumento mucho más financiero que económico. Es decir, que las CAR se preocupen más por facturar y recaudar, para mantener determinada estabilidad financiera (la cual puede estar en riesgo si se recortan otras fuentes de financiamiento, como por ejemplo las transferencias del Estado), que por incentivar la reducción de los niveles de cargas contaminantes. Esto puede ocurrir con tasas bajas que hacen que el costo de oportunidad para los usuarios de reducir los niveles de vertimientos, sea menor al costo de oportunidad de pagar la TR, lo que al final mantiene estable o aumenta los niveles de cargas contaminantes vertidas a los cuerpos de agua y por ende el recurso financiero obtenido por las CAR por concepto de la TR.

Otros problemas institucionales que afectan el buen funcionamiento de la TR pueden ser los identificados por Rudas (2005) referentes a la desarticulación de las normas del agua de los sistemas de

ordenamiento territorial y una limitada capacidad de sanción a quienes no cumplen las normas de vertimiento.

El tema de la capacidad institucional es fundamental para cualquier programa de gestión y regulación ambiental. En el caso de los instrumentos económicos como la TR, el funcionamiento depende de otros factores, en donde se hace necesario que los entes encargados de aplicarlos tengan claro el objetivo de los instrumentos y no los distorsionen, y además, que tengan la capacidad de ejercer vigilancia, control y sanción, y producir información de calidad y en los tiempos adecuados a fin de evaluar y detectar los problemas en la aplicación de los instrumentos para corregirlos a tiempo. Ya que, si no hay vigilancia, control y sanción por parte de la autoridad ambiental en este caso la CAR, los usuarios tendrán el incentivo a la evasión y la efectividad del instrumento se pierde.

Otro posible problema que puede estar enfrentando la TR, se da en el caso de las empresas que estén disminuyendo los niveles de vertimientos, ya que no se cuenta con información para saber si esta reducción se debe a que las empresas están produciendo con tecnologías más limpias, que es el fin último de la TR, o si están utilizando PTAR. Si el costo de oportunidad de implementar una PTAR es menor al costo de oportunidad de implementar una tecnología de producción más limpia, las empresas preferirán la primera opción, que, si bien logra reducir los niveles de vertimientos de cargas contaminantes, siempre se debe tener presente que el objetivo de largo plazo del crecimiento verde es una producción más sostenible.

Finalmente, es necesario evaluar si se han hecho esfuerzos suficientes en el tema de conciencia ambiental, el cual es un complemento fundamental a los instrumentos económicos como la TR. Los usuarios posiblemente tienen una visión de corto plazo, en ese sentido, hacen la evaluación costo-beneficio de verter cargas contaminantes en los cuerpos de agua, solo tomando en cuenta el costo presente, es decir, el pago de la TR, pero si el usuario toma en cuenta el costo futuro asociado a la contaminación del agua, es posible que cambie su decisión y reduzca los vertimientos.

Los costos futuros asociados a la contaminación del agua dependen del tipo de usuario, por ejemplo, para las empresas conlleva un aumento de los costos de producción, dado que la contaminación reduce a futuro la disponibilidad del recurso hídrico y aumenta su precio. Mientras que para las administraciones municipales encargadas de la operación de las empresas de acueducto y alcantarillado y por ende de los vertimientos, el costo futuro está asociado a problemas de salud de la población, lo que aumenta el costo de atención, además del deterioro de actividades económicas propias de cada municipio por problemas de disminución de la productividad agrícola, reducción de las zonas de pesca, contaminación de zonas turísticas, entre otros.

En resumen, la estadística descriptiva y el análisis econométrico permiten ver que las variaciones en la TR explican mínimamente las variaciones en los niveles de cargas contaminantes DBO y SST vertidas a los cuerpos de agua, corroborando los resultados encontrados en otros estudios como el de Galarza & Rudas (2009).

Aun así, creemos que los instrumentos económicos como la TR, son los incentivos adecuados para la reducción de los vertimientos contaminantes en los cuerpos, ya que son quienes introducen la racionalidad del agente económico en el problema de la contaminación y permiten hacer óptima la decisión de reducirla por medio de la implementación de tecnologías de producción más limpias. Las hipótesis están dirigidas a que el problema radica en la aplicación de la TR, la cual posiblemente no se

esté haciendo de forma adecuada por problemas de institucionalidad en las CAR, dificultades técnicas para la actualización del factor regional y falta de esfuerzos en generación de conciencia ambiental en los usuarios de puntos de vertimientos. También es necesario evaluar el valor de la TR, en el sentido que sea un valor que incentive al usuario a reducir los vertimientos a los cuerpos de agua: una decisión costo efectiva para los agentes.

13 EFECTO DE LAS VARIACIONES DE LA TUA EN LA CANTIDAD DE AGUA UTILIZADA EN LOS SECTORES DE AGRICULTURA, AGUA POTABLE E INDUSTRIA.

La TUA es un instrumento de política ambiental, correspondiente al cobro por parte del Estado de una tarifa por el uso y concesión de agua en Colombia, es decir, por tomar el recurso hídrico directamente de las fuentes naturales de agua. La TUA tiene dos objetivos principales, por un lado, ser un incentivo para el uso racional del agua aumentando el costo de oportunidad, con el fin de conservar las fuentes naturales y por otro lado, busca a través de los recursos cobrados, recuperar las mismas fuentes naturales de agua de los daños causados por las externalidades negativas de los consumidores, utilizándolos como inversión ambiental.

La TUA está reglamentada por el Decreto 155 de 2004, el cual reglamenta el Artículo 43 de la Ley 99 de 1993, y ha sufrido cambios por cuenta de actos legislativos tales como la Resolución 240 de 2004, la Resolución 865 de 2004, la Resolución 866 de 2004, el Decreto 4742 de 2005, la Resolución 872 de 2006, la Ley 1151 de 2007 (artículo 108) y la Ley 1450 de 2011 (artículo 216) (MADS, 2014).

Su cálculo está en función de un factor regional variable para cada fuente natural de agua concesionada y una tarifa mínima establecida por el Estado. Así mismo, el factor regional depende de una serie de variables relacionadas con la disponibilidad del recurso hídrico, las necesidades de inversión en recuperación y las condiciones socioeconómicas alrededor de la fuente hídrica (MADS, 2014). La TUA puede ser cobrada por las Corporaciones Autónomas Ambientales (CAR), las Corporaciones para el Desarrollo Sostenible (CDS), los grandes centros urbanos y los Parques Nacionales Naturales.

El objetivo de este numeral es presentar un análisis del comportamiento de la TUA en el periodo 2010-2015 a nivel nacional, por medio de un ejercicio de estadística descriptiva. También, determinar si la TUA ha logrado ser un instrumento económico racionalizador del consumo de agua y de ser así, identificar en que medida lo ha logrado, por medio de un modelo econométrico aplicado a nivel nacional.

La estructura de este numeral inicia con una descripción de la metodología utilizada para la organización y análisis de los datos, además de presentar las variables objeto de estudio y mencionar los principales problemas encontrados al momento de procesar la información, la metodología del modelo econométrico utilizado. Luego presentar el comportamiento de la TUA a nivel nacional y finalmente los resultados del modelo econométrico, junto a las posibles hipótesis que pueden explicar los resultados encontrados.

13.1 Metodología

La información para lograr este análisis del comportamiento de la TUA en Colombia para el periodo 2010-2015, fue obtenida a través del economista Guillermo Rudas, quien entregó en archivos separados por año y por CAR, información correspondiente al cobro de la TUA en 34 CAR y el Sistema de Parque Naturales. A partir de ello, se procede a unificar la información en una base de datos, encontrando que se enfrenta al análisis de 232.579 registros de 25 variables, de las cuales se toman en cuenta las siguientes:

- **Volumen concesionado:** Volumen de agua en m³ al año, que se autoriza aprovechar a quien se otorga la concesión de agua para una determinada actividad (miles m³/año).

- **Volumen captado:** Volumen de agua en m^3 al año, efectivamente aprovechados por quien tiene la concesión de agua para una determinada actividad (miles m^3 /año).
- **Factor regional:** Es un factor adimensional que está en función de las necesidades de inversión para la recuperación de la fuente hídrica y las necesidades socioeconómicas de la población que habita alrededor de la misma.
- **Tasa de uso de agua:** Es el producto de multiplicar el factor regional por la tarifa mínima nacional, y determina el valor a pagar por la concesión y captación de agua directamente de una fuente natural (\$).
- **Valor a pagar:** Expresa el valor monetario de las captaciones hechas al año por parte de quien tiene la concesión de agua (miles de \$/año).
- **Recaudo:** Valor monetario recolectado al año por parte de la autoridad ambiental por concepto de la TUA (miles de \$/año).
- **Tipo de Uso:** Actividad económica a la que será destinada el agua concesionada.

Además, se construyen las variables.

- **Déficit de recaudo:** Diferencia entre el valor a pagar y el valor recaudado (miles de \$/año).
- **Tasa de facturación:** Cociente entre el valor facturado y la concesión de agua
- **Tasa de recaudo:** Cociente entre el valor recaudado y la concesión de agua

Las variables volumen concesionado, volumen captado, valor a pagar, recaudo y déficit de recaudo se toman en miles a fin de lograr una escala más adecuada.

Finalmente se construye un panel de datos para el modelo econométrico, donde se toman las variables: captación, TUA y tasa de facturación, en medidas promedio y clasificadas por CAR y por tipo de uso, además que se construyen las variables dummy actividad económica i (act_ecca_i) que toman el valor de 1 si la captación de agua se utiliza en el tipo de uso i y 0 en otro caso.

13.2 Análisis de datos

Para analizar el comportamiento de la TUA en Colombia en el periodo 2010-2015 se desarrolla una estadística descriptiva a nivel nacional, donde se observa la evolución año a año de las variables de interés y la relación conjunta entre ellas, para lo cual se elaboran gráficos conjuntos, y para el caso específico de la relación entre el volumen captado de agua y la TUA, se hacen cálculos de coeficiente de correlación.

Para el modelo econométrico, dado que el interés es estimar el impacto de las variaciones de la TUA sobre las variaciones de las captaciones de agua, se debe correr una regresión donde la variable dependiente será logaritmo de la media de las captaciones de agua en la CAR i para el tipo de uso i en el año t ($captacion_{it}$), y la variable explicativa será el logaritmo de la media de la TUA aplicada en la CAR i para el tipo de uso i en el año t (tua_{it}).

Aunque se tiene información sobre la TUA, por recomendación del equipo técnico del Departamento de Nacional de Planeación (DNP) que acompaña esta consultoría, se utilizará una variable proxy, ya que la TUA no presenta variaciones importantes. En un principio se consideró utilizar como variable proxy de la TUA, el cociente entre la facturación y las captaciones, pero como se puede ver, esta variable depende de las captaciones por lo que al momento de ejecutar el modelo se presentaría una alta correlación a causa de la definición de las variables y no a causa del fenómeno estudiado.

Luego se recomendó utilizar como variable proxy de la TUA, el cociente entre recaudo y concesión (tasa de recaudo) pero no fue posible utilizar esta variable ya que existe un importante déficit en información de recaudo, falta el 40,53% de la información sobre esta variable.

Finalmente, la variable que será utilizada como proxy de la TUA será el cociente entre la facturación y la concesión (tasa de facturación) (Ecuación 28)

Ecuación 28. Tasa de facturación

$$tf = \frac{\text{facturación}}{\text{concesión}}$$

De este modo, el modelo a estimar sería el siguiente (Ecuación 29)

Ecuación 29. Modelo por estimar sin actividad económica

$$\log(\text{captación}) = a + \beta_1 \log tf_{it} + u_{it}$$

Se tomó la decisión de clasificar los datos por CAR y por tipo de uso y no por municipio como se hizo en los modelos de la Tasa TR porque la variable sitio de captación no fue interpretada de la misma manera por las CAR: unas CAR reportaron el sitio de captación como el municipio, pero otras lo reportaron como la vereda o el sitio específico donde se hace la captación, incluso algunas CAR como CDA, reportaron la coordenada exacta donde está la captación de aguas y otras como CARSUCRE reportaron como sitio de captación, la tecnología de captación, por ejemplo bocatoma, pozo profundo, entre otros.

También se agregan al modelo variables explicativas como la dummy act_ecca_i , como una forma de estimar el efecto que tiene el tipo de uso sobre el nivel de captación. De ese modo el modelo a estimar es el siguiente (Ecuación 30):

Ecuación 30. Modelo por estimar con actividad económica

$$\log(\text{captación}) = a + \beta_1 \log(tf_{it}) + \delta_1 act_ecca_1 + \delta_2 act_ecca_2 + \dots + \delta_n act_ecca_n + u_{it}$$

Suponiendo las variables explicativas exógenas, se puede plantear un panel de datos estático con tres posibles estimaciones. La primera es un modelo *pooling OLS* el cual no toma en cuenta la estructura de panel de datos y hace una estimación por mínimos cuadrados suponiendo datos de corte transversal¹⁵¹.

La segunda es una estimación de efectos fijos individuales, la cual contempla que es posible que características invariables en el tiempo, pero que varían entre individuos, provoquen que el fenómeno no se pueda estandarizar en una sola forma funcional, por lo que estima interceptos diferentes para cada individuo (para cada CAR y cada tipo de uso en este caso) y una pendiente común, generando N modelos diferentes. La estimación del modelo de efectos fijos se hace por medio de la metodología Within que consiste en un modelo de desviaciones de la media.

La tercera estimación es efectos aleatorios, la cual al contrario que efectos fijos, contempla que las características invariantes en el tiempo, pero que varían entre individuos, se pueden estandarizar en una sola forma funcional, por lo que calculan un intercepto medio para todos los individuos (sería en este caso para todas las CAR y todos los tipos de uso) y una pendiente común como lo hace efectos fijos, generando así un solo modelo.

151 Un conjunto transversal de datos contiene observaciones sobre múltiples fenómenos en un momento determinado. En este caso, el orden de las observaciones es irrelevante.

Para elegir cuál de los tres modelos es el más adecuado, se someten a pruebas de hipótesis comparativas así (Ecuación 31). De los resultados de estas tres pruebas de hipótesis se determina finalmente que modelo será utilizado.

Ecuación 31. Pruebas de hipótesis para selección de modelos de datos panel

Prueba 1: Breusch Pagan test

$$H_0: \text{Pooling OLS es adecuado}^{152}$$

$$H_1: \text{Pooling no es adecuado}^{153}$$

Si resulta que el modelo pooling no es adecuado se aplica la prueba 2

Prueba 2: Hausman test

$$H_0: \text{Efectos Aleatorios es más adecuado}$$

$$H_1: \text{Efectos Fijos es más adecuado}$$

13.3 Análisis de información faltante

A partir de la revisión de la información reportada, se encontraron tres principales problemas para el procesamiento y análisis de los datos. El primer problema tiene que ver con que algunas CAR no reportan la información en el formato solicitado por MADS, específicamente CORPOMAG en los años 2011 y 2012 y la CRC en los años 2011 y 2012, razón por la cual se adaptó el reporte de las CAR para extraer la información sobre las variables objeto de análisis, que tuvieran en común el formato del MADS.

El segundo problema está relacionado con la continuidad de la información a través del tiempo. Varias CAR no reportaron en su totalidad los seis años del periodo de análisis, en la Tabla 77 se presenta los años no reportados por CAR. El tercer problema está relacionado con la continuidad de la información a través de usuarios y de variables, puesto que se encontró para todas la CAR espacios vacíos, incluso columnas de variables sin ningún tipo de datos. En la Tabla 78 se presenta el número de datos faltantes por variable para el total de las CAR.

En total son 232.579 registros de 25 variables, lo que equivale a 5.814.475 de datos de los cuales faltan 934.856, es decir, falta el 16,08% de los datos. Es debido a la importante cantidad de datos faltantes que la información de las variables se resume en medidas promedio y no en medidas totales.

Tabla 77. Total CAR. Datos faltantes por año 2010-2015

Corporación Autónoma Regional CAR	Años Faltantes
AMVA	2015
CAR	2015
CAS	2015
CDMB	2015
CODECHOCO	2013, 2014, 2015

¹⁵² H_0 : Hipótesis nula

¹⁵³ H_1 : Hipótesis alternativa

Corporación Autónoma Regional CAR	Años Faltantes
CORALINA	2014, 2015
CORMACARENA	2015
CORPOMAG	2013, 2014, 2015
CORPOAMAZONIA	2015
CORPOCESAR	2011, 2012, 2013, 2014, 2015
CORPOCHIVOR	2015
CORPOGUAJIRA	2015
CORPONOR	2014, 2015
CORPOURABA	2015
CRC	2013, 2014, 2015
CRQ	2012, 2015
SDAB	2015
PARQUES NACIONALES	2010

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

Tabla 78. Total CAR. Datos faltantes por variables 2010-2015

Variable	Número de registros
Nombre o razón social del usuario	2.289
Fecha inicio del programa de cobro de la tasa (dd/mm/aa)	21.320
Resolución de concesión n°	6.673
Periodo de concesión (meses)	33.082
Tipo de uso	11.917
Clase de medición	66.710
Volumen concesionado para el año reportado m ³	21.733
Volumen captado para el año reportado m ³	64.611
Periodo reportado	53.830
Tipo de fuente	8.245
Nombre de la fuente	7.182
Microcuenca/subcuenca/cuenca	11.682
Sitio de captación	15.423
Instrumento de planificación	114.448
Coefficiente de inversión	43.266
NBI	64.024
Coefficiente de condiciones socioeconómicas	33.764
Índice escasez	64.121
Coefficiente de escasez	38.848
Factor de costo de oportunidad	48.295
Factor regional	26.208
Tasa por utilización del agua-TUA	3.412
Tarifa unitaria anual de la tasa por utilización de agua	77.281
Valor a pagar usuario sujeto pasivo	2.210
Valor recaudado \$	94.282

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

13.4 Análisis de resultados

13.4.1 COMPORTAMIENTO NACIONAL 2010-2015

Con el fin de presentar los resultados a nivel nacional respecto del comportamiento de la TUA en el periodo 2010-2015, es necesario agregar el resumen de información año a año construido con medidas promedio para todas y cada una de las CAR en los periodos que reportaron información, las cuales acumulan 232.579 registros. Esto hace que el análisis nacional también se haga considerando medias promedio de las variables de interés. Para el cálculo de las medias promedio a nivel nacional se utiliza una media ponderada, donde el ponderador se toma a partir del número de concesiones otorgadas promedio año de cada CAR.

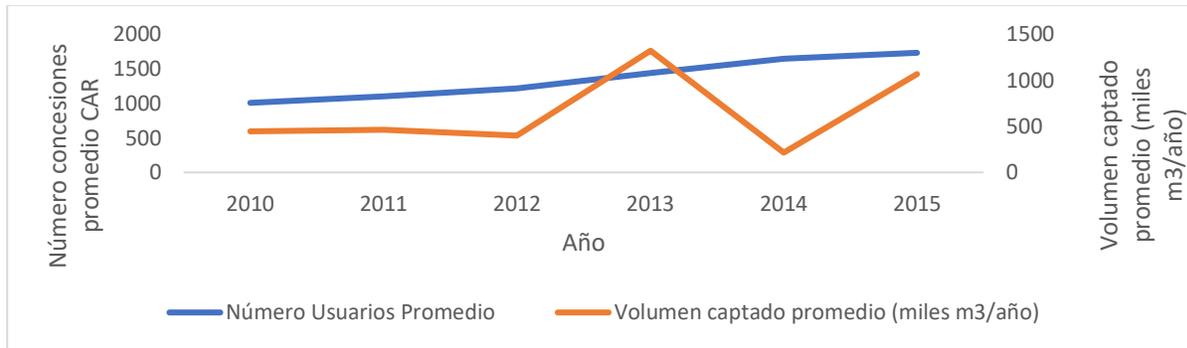


Figura 65. Colombia. Número de concesiones promedio vs volumen captado promedio 2010-2015
Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

En Figura 65 se puede observar que, en el periodo de estudio, el número de concesiones promedio tiene una tendencia creciente y medianamente marcada, mientras que el volumen de captación de agua presenta dos aumentos importantes en 2013 y 2015. Al observar el comportamiento por CAR se encuentra que las CAR que presentaron aumentos considerables de los niveles de concesión y captación de agua en los años 2013 y/o 2015 fueron: CARDIQUE, CDA, CORANTIOQUIA, CORNARE, CORPOCALDAS, CORPORINOQUIA, CORPOURABA.

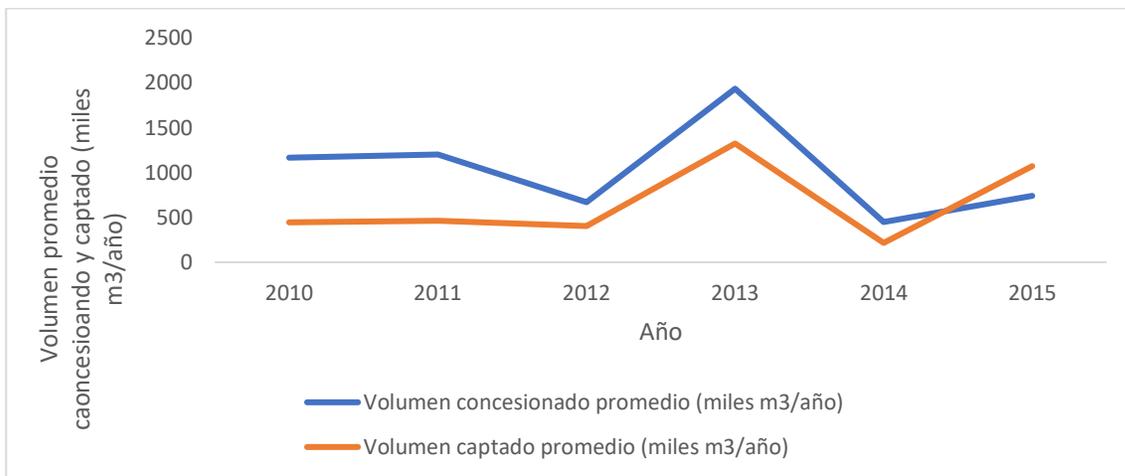
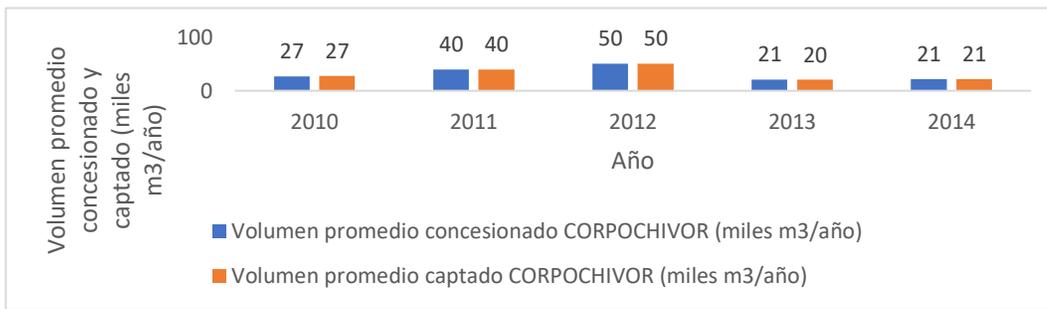


Figura 66. Colombia. Promedio volumen concesionado vs promedio volumen captado 2010-2015
Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

En la Figura 66 también se puede observar el aumento del volumen concesionado y captado promedio en los años 2013 y 2015. En general el volumen concesionado promedio es mayor al volumen captado promedio, ya que los usuarios normalmente solicitan una concesión mayor a la captación que realizan. Sin embargo, en 2015 se observa que el volumen captado promedio logra superar al volumen concesionado promedio. Al analizar los datos por CAR se encuentra que posiblemente la causa es que en 2015 en CORNARE varios usuarios captaron niveles de agua considerablemente mayores a los niveles que tenían concesionados, además para 2015 se tienen registro de tan solo 18 CAR y la participación de CORNARE es del 12%. Aun así, también se presentan casos donde el volumen concesionado y captado son muy cercanos, tal como se muestra en el Cuadro 25

Cuadro 24. Caso de volumen concesionado y volumen captado iguales

Al observar los volúmenes de agua concesionados y los volúmenes efectivamente captados se encuentra que lo más común es que las captaciones superen a las concesiones. También se encuentran casos donde las captaciones son menores que las concesiones. Llama mucho la atención el caso de la Corporación Autónoma Regional de Chivor (CORPOCHIVOR), la cual para el periodo 2010-2014 reporta que en todas las concesiones de agua que otorgó se captó exactamente la cantidad de agua concesionada, tal como lo presenta la siguiente figura.



Pensar que todos los usuarios durante todos los años captaron exactamente la misma cantidad de agua que les fue concesionada es complejo. Es posible que la corporación presente dificultades para verificar los niveles de captación y reporta la misma información para ambas variables, tal como lo indica el Decreto 155 de 2004.

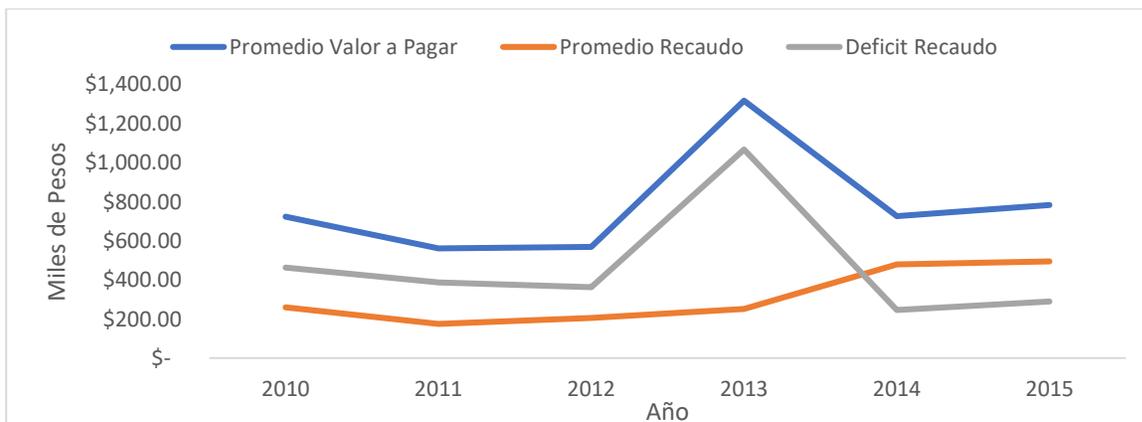


Figura 67. Colombia. Valor a pagar promedio por captación vs recaudo promedio 2010-2015

Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

En cuanto a facturación y recaudo (Figura 67) hay déficit en todo el periodo de estudio. El déficit es aproximadamente constante entre 2010 y 2012, en 2013 aumenta al igual que lo hicieron los volúmenes de agua concesionados y captados, ya que la facturación aumentó, pero el recaudo no. En 2014 y 2015 se redujo la facturación, aumentó el recaudo y disminuyó el déficit. Aun así, es importante tener en cuenta la gran cantidad de datos faltantes de la variable recaudo. En promedio durante el periodo estudiado el recaudo equivale al 41,92% de la facturación.

En cuanto a la relación entre la TUA y el volumen de captación (Figura 68), dado el dato atípico de 2013 y lo corto de la serie no es posible ver claramente la tendencia de su relación, pero al calcular el coeficiente de correlación se encuentra que es de 0,055, indicando una asociación lineal positiva débil entre las variables, tal como ocurrió en el caso del coeficiente de correlación de la TR con las cargas DBO y las cargas SST. Esto va indicando que es posible que no se encontrará una relación fuerte entre la TUA y los niveles de captaciones de agua, aun así, se debe recordar que el coeficiente de correlación es una medida de asociación lineal, más no de determinación, por lo que este resultado se debe complementar con la estimación del modelo econométrico.

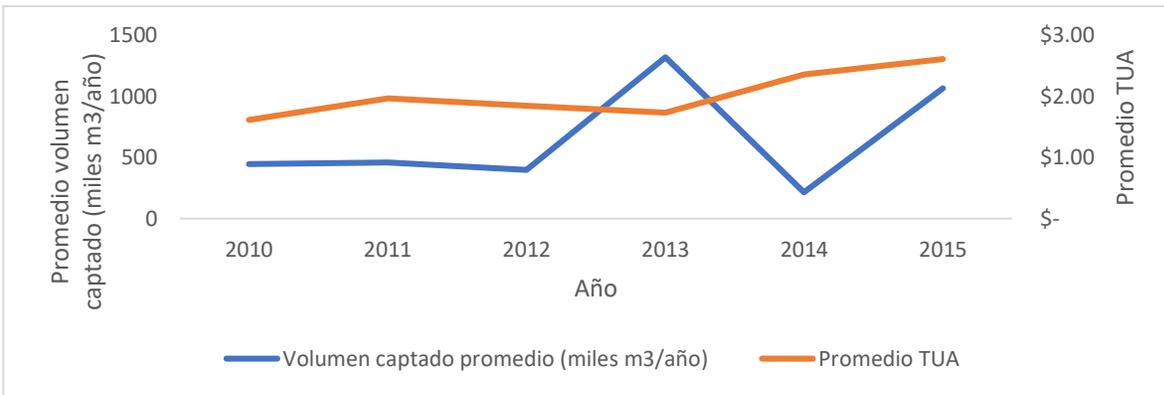


Figura 68. Colombia. Volumen captado promedio vs valor promedio TUA 2010-2015
Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos propios

En las Figura 69 y Figura 70 se presentan los usos que más demandan concesiones de agua. Para ello se toma la información del último año disponible para cada CAR, siempre y cuando este último año corresponda al 2014 o 2015, de este modo se agrega el promedio de captación de agua por tipo de uso de las CAR y se clasifica por un uso, dos usos y tres usos, encontrando que, para un tipo de uso, los sectores que en promedio más demandan agua son respectivamente el minero, energía e industrial. Para dos o más tipos de uso los dos sectores predominantes son energía e industrial, energía y minero, agropecuario y energía. Se debe hacer la claridad que un importante nivel de captaciones (5,12% de los registros) no está clasificado bajo ningún uso (sin información).

Puede parecer extraño que las captaciones de agua del sector minero aparezcan como las más grandes en promedio, cuando la demanda de agua más grande en Colombia corresponde el sector agrícola (IDEAM, 2014a). Debemos recordar que las captaciones de agua son un subconjunto de la demanda de agua, lo que puede estar ocurriendo es que el sector agrícola es altamente informal por lo que muchas de sus captaciones no están registradas ante las CAR, mientras que el sector minero aunque también tiene un nivel importante de informalidad, las grandes empresas mineras son formales y sus captaciones deben estar registradas por las CAR, entonces dado su tamaño, en promedio las captaciones son mayores, pero seguramente al sumar las pequeñas captaciones del sector agropecuario deben ser superiores, lastimosamente dado el déficit de información no es conveniente sumar tal como se expresó

en la metodología. Además, el uso agropecuario se combina con más actividades económicas que el sector minero, tal como lo muestra la Figura 70. En cuanto al sector energía, en el ENA 2014 aparece como el segundo sector que más demanda agua y en este análisis aparece como el segundo sector que más capta agua según los registros de las CAR.

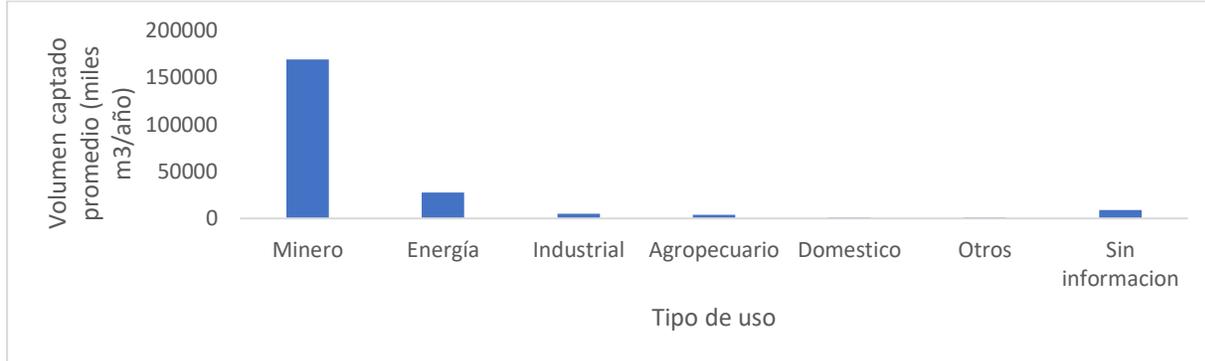


Figura 69. Colombia. Captación de agua promedio. Un uso 2014-2015
Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos del autor

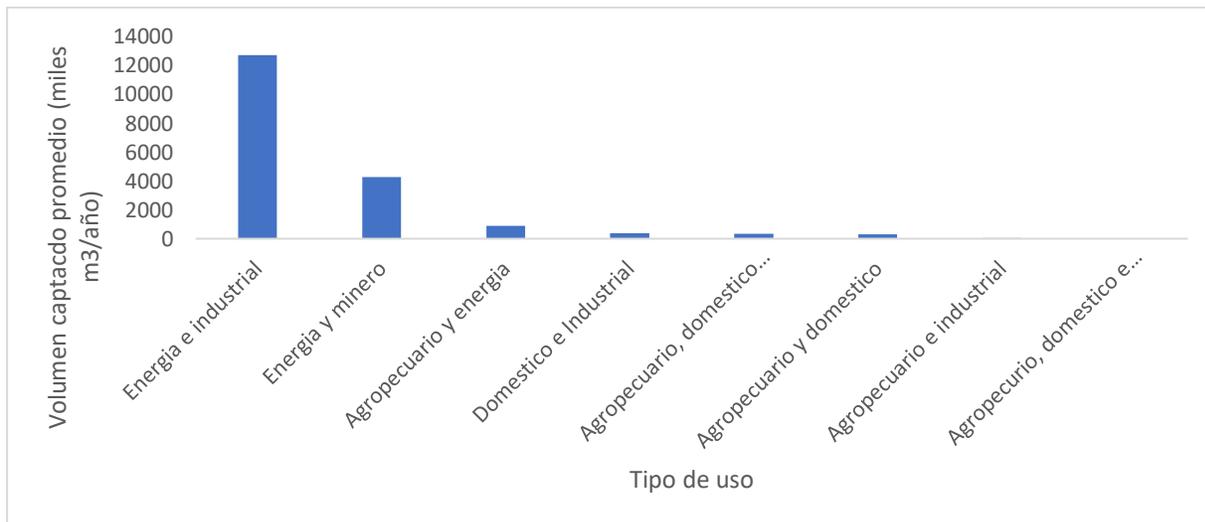
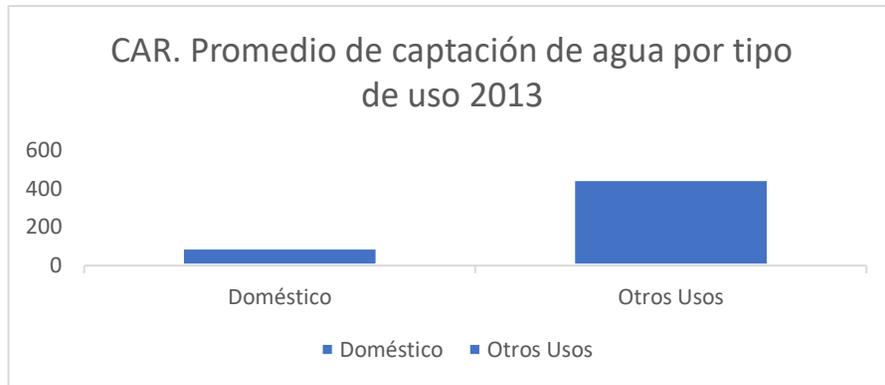


Figura 70. Colombia. Captación de agua promedio. Dos usos o más usos 2014-2015
Fuente: MinAmbiente. Elaboración y cálculos del autor

Se debe hacer la salvedad que para muchas concesiones no está reportada la actividad o actividades económicas a las que se destinará el agua captada o que las actividades no están desagregadas (sin información), un ejemplo de ello se presenta en el .

Cuadro 25. Caso de no diferenciación de las concesiones por tipo de uso.

Para la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR se tiene información sobre concesiones de agua para el periodo 2010-2014. En el año 2014 no presenta información sobre el tipo de uso al que se destinará la concesión de agua, en el año 2013 tan solo distingue entre dos usos: doméstico y otros usos. Esto no permite analizar para que se está utilizando el agua concesionada por la CAR.



13.4.2 MODELO ECONÓMICO

Al clasificar las variables captación y tasa de facturación en medidas promedio por CAR y por tipo de uso para el periodo 2010-2015, se logró construir un panel desbalanceado de 640 observaciones, al cual se agregó las variables dummy act_{ecca}_i . En la Tabla 79 se presenta la estadística descriptiva del logaritmo de las principales variables de interés. Como ya se mencionó en la metodología, el modelo a estimar es el planteado en la Tabla 79.

Tabla 79. Estadística Descriptiva

Estadística descriptiva del logaritmo de las variables de interés		
Estadístico	log(captación)	log(facturación/concesión) tf
Mínimo	4.394	-744.081
Cuartil 1	10.764	-0.27849
Mediana	11.985	0.05713
Media	12.286	0.57835
Cuartil 3	13.638	0.61595
Máximo	22.361	23.10406

Fuente: Elaboración y cálculos propios

Para iniciar la estimación del modelo se calcula el coeficiente de correlación entre $\log(captación_{it})$ y el $\log(tf_{it})$ encontrando que es de -0,079, lo que indica una asociación lineal débil entre las variables. Se debe recordar que para las variables en valor normal se encontró una asociación lineal negativa moderada. Entonces, aunque el coeficiente de correlación tiene el signo esperado, al parecer la relación

entre las variables no tiene el nivel que se desearía. Esto mismo ocurrió con el coeficiente correlación de la TR con las cargas DBO y SST tomados en logaritmos.

Luego de calcular el coeficiente de correlación entre las variables de interés, se procede con la estimación del modelo propuesto, por medio de una regresión pooling OLS, un estimador de efectos fijos Within y un estimador de efectos aleatorios. Los parámetros estimados para la pendiente asociada a la t_f para cada caso se relacionan en la Tabla 80.

Tabla 80. Modelos Estimados por Tipo de Estimación

Tipo de Estimación	Coefficiente Estimado t_f	p valor	R2 del modelo
Pooling OLS	-0,030866	0,303962	0.22544
Efectos Fijos (Within)	-0,365550	7,83E-06	0,070833
Efectos Aleatorios	-0,150768	0,0003256	0,400114

Fuente: Elaboración y cálculos propios

En los tres casos, el coeficiente tiene el signo esperado e indica una relación inversa entre la t_f , que es el proxy de la TUA y los niveles de captación. Para el modelo pooling, el p valor indica que el parámetro asociado a la t_f no es estadísticamente significativo, pero en los modelos de efectos fijos y efectos aleatorios este parámetro si es estadísticamente significativo. Es decir, que las variaciones en la t_f impactan a las variaciones de los niveles de captaciones de agua.

Aun así, se debe destacar que el R^2 del modelo de efectos fijos es muy bajo, y el R^2 del modelo de efectos aleatorios es superior, pero tiene más regresores, es decir, que si bien se encontró que la t_f tiene una relación determinística con las captaciones y que tiene el signo esperado, estos modelos muestran que variaciones en el proxy de la TUA tiene baja capacidad para explicar las variaciones de los niveles de captaciones.

Una vez estimados los modelos se procede con las pruebas de hipótesis para elegir el modelo más adecuado, encontrando que el modelo de efectos fijos es el más adecuado, por lo que se establece que un solo modelo es inconsistente, y por lo tanto existen N modelos diferentes que comparten la misma pendiente, pero tienen intercepto diferente según la CAR y el tipo de uso. Los resultados del Breusch Pagan test y el Hausman test se presentan en la Tabla 81.

Tabla 81. Pruebas para selección de modelos TUA

Prueba	H_0	H_1	P-Valor
Breusch Pagan test	Polling OLS es adecuado	Polling OLS no es adecuado	<2.2E-16
Hausman test	Efectos aleatorios es más adecuado	Efectos fijos es más adecuado	3,10E-06

Fuente: Elaboración y cálculos propios

El resultado más importante es que por un aumento de 1% en la t_f (que es la proxy de la TUA), se espera una reducción de los niveles de captación de 0,365550%. Si bien esto indica que la TUA está logrando su objetivo, el R^2 del modelo de 0,070833 lo pone en duda, ya que tan solo se explican el 7,0833% de las variaciones de las captaciones, cuando sería deseable que la TUA tuviera un nivel de influencia mayor sobre las captaciones de agua.

El segundo resultado es que existen diferencias de nivel en las captaciones de agua que dependen de la CAR que otorga el permiso de concesión de aguas (al igual que el modelo de la TR y los vertimientos) y

el tipo de uso al que será destinado. En la Tabla 82 se presenta los tipos de uso cuyo modelo tiene los interceptos más altos, es decir, que tienen un nivel de captación de agua autónomo mayor, y en la Tabla 83 se tiene los tipos de uso con los interceptos más bajos. Al igual que en la estadística descriptiva se ve que los tipos: uso minero y de energía se destacan entre los tipos de uso con mayores captaciones de agua promedio.

Tabla 82. Tipos de uso por CAR con los interceptos más altos

Actividad Económica y CAR	Intercepto
Minero_CORANTIOQUIA	7,96366043
Sin información_CORPOGUAJIRA	7,902851529
Agropecuario_CORPOGUAJIRA	6,993880141
Industrial_CORPOGUAJIRA	6,762443375
Doméstico_CORPOGUAJIRA	6,599403689
Doméstico y energía_CORANTIOQUIA	6,169499456
Energía_CORPORINOQUIA	6,018979443

Fuente: Elaboración y cálculos propios

Tabla 83. Tipos de uso por CAR con los interceptos más bajos

Actividad Económica y CAR	Intercepto
Agropecuario e industrial_AMVA	-5,930191637
Sin información_AMVA	-5,279309882
Agropecuario e industrial_DAGMA	-5,137219939
Doméstico_AMVA	-4,741121561
Agropecuario y doméstico_AMVA	-4,545617042
Agropecuario_CORALINA	-4,370602649
Agropecuario e industrial_CORPOBOYACA	-4,36914437

Fuente: Elaboración y cálculos propios

Analizando los resultados, se puede decir que el número de usuarios de captaciones de agua ha aumentado al igual que el promedio de las captaciones. Existe un importante problema de recaudo, el déficit es de 55.08%. Los sectores económicos que en promedio más captan agua son energía y minero, pero en el agregado, según el ENA 2014, los sectores que más demandan agua son el agrícola y energía. Si bien la TUA tiene un impacto negativo en los niveles de captación, explica mínimamente las variaciones de los mismos. En esta sección se presenta un recuento de las posibles hipótesis que pueden explicar el hecho de que la TUA no tenga el impacto esperado sobre las captaciones de agua.

13.4.3 ANÁLISIS A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL MODELO

Una primera explicación está relacionada con el aumento de los usuarios de captaciones de agua, lo cual es una situación normal que puede estar explicada por dos causas. La primera está relacionada con el aumento de la actividad económica del país y el número de productores en las diferentes ramas de actividad económica, los cuales demandan captaciones de agua.

La segunda puede estar relacionada con una mejora en el registro de usuarios por parte de las CAR. Se sabe que existe un importante nivel de subregistro de captaciones en el país, entonces el aumento en el número de usuarios puede estar explicado en parte por el esfuerzo de las CAR para registrar aquellos usuarios que están captando agua directamente de las fuentes desde hace varios años sin ningún tipo de

autorización, un fenómeno al que se puede llamar formalización de captaciones, el cual puede ser tomado como una mejora de la capacidad institucional de las CAR en cuanto están ejerciendo control sobre una mayor cantidad de puntos de extracción.

El aumento del número de usuarios, junto con las captaciones promedio de agua, indica que los nuevos usuarios registrados están captando más agua que los antiguos, lo cual es una señal de alerta para las autoridades ambientales en cuanto su objetivo de conservación del agua por medio de la racionalización del consumo. Una posible explicación está relacionada con el tamaño de la actividad económica de los usuarios; es posible que muchos de los nuevos usuarios capten agua para actividades económicas de gran tamaño o que el tamaño de la actividad económica de los antiguos usuarios haya crecido a través del tiempo.

El factor por analizar en el aumento del número de usuarios está relacionado con el tipo de actividad económica para la que utilizan la captación de agua, posiblemente los inversionistas estén tomando más en cuenta la productividad del agua en los sectores económicos que el costo de uso, lo que los inclina a invertir en actividades económicas con mayor valor agregado a pesar de que demanden niveles más grandes de captaciones de agua promedio como el caso de la energía.

Lastimosamente no se cuenta con información que permita medir el tamaño de la actividad económica de los usuarios de captaciones de agua. Aun así, es necesario un esfuerzo institucional de vigilancia y control por parte de las CAR para verificar que los usuarios estén captando las cantidades de agua necesarias para la actividad económica y no cantidades superiores (cumplimiento de la concesión). Y buscar mecanismos que incentiven el uso del agua en actividades económicas con menos demanda de recurso hídrico, o tecnologías de producción más eficientes en cuanto al consumo de agua en los procesos productivos.

Otro problema identificado es el subregistro de información, que como ya se mencionó, restringe la capacidad del análisis que se puede hacer sobre el funcionamiento de la TUA y el comportamiento de las captaciones. Este también es un problema institucional en la CAR, en el sentido que refleja que los usuarios no están reportando la información a la CAR posiblemente porque no están reconociendo a la autoridad ambiental o como una estrategia de evasión.

Al respecto, MADS et al., (2013) hacen una evaluación de la capacidad institucional de las CAR por medio del índice general del nivel de la implementación por parte de las autoridades ambientales, el cual consiste en el número de pasos adecuadamente desarrollados y documentados por la autoridad ambiental en la implementación del instrumento (MADS et al., 2013). Para Colombia este índice fue de 48%. Por CAR, los mejores índices correspondieron a CAR, AMVA, CORPOGUAVIO, CORPOBOYACÁ, CARDER, CORTOLIMA, CORNARE, CORALINA, CORPOURABÁ Y CORANTIOQUIA y los peores correspondieron a CODECHOCÓ, CAS, CSB, CDA y DADMA, que son las CAR con menos recursos económicos (MADS et al., 2013).

También ocurre que los usuarios no tienen sistemas de medición. Respecto al tema, la Propuesta de Ajuste de Tarifas Mínimas de la Tasa de Uso del Agua (MADS, 2014) dice que posiblemente una gran mayoría de los usuarios no está midiendo su consumo de agua ya que según el Decreto 155 de 2004 (MADS, 2004a), cuando un usuario no hace medición de su nivel de captación de agua, se le cobrara por concepto de TUA el valor concesionado, en ese sentido, una gran cantidad de usuarios posiblemente están pagando más de lo que en realidad deberían. La no medición impide conocer las variaciones del consumo de agua y por lo tanto restringe el análisis del funcionamiento de la TUA, de hecho, es posible

pensar que la no medición es un incentivo para que los usuarios no reduzcan el consumo de agua, ya que esta reducción no se vería reflejada en el valor a pagar.

También se observa que el déficit de recaudo es alto (55,08% en promedio) y creciente. Este también es un problema institucional en el sentido de que las CAR presentan dificultad para el cobro de la TUA. De hecho, MADS (2014) en su Propuesta de Ajuste de Tarifas Mínimas de la Tasa por Utilización de Agua encontró que los recursos percibidos por las CAR por concepto de TUA equivalen a menos del 2% de sus ingresos corrientes y que estos recursos son insuficientes para cubrir los costos de conservación de la oferta hídrica en el país.

El problema de subregistro de información y del alto déficit de recaudo está relacionado con el no funcionamiento de la TUA. Es necesario implementar estrategias de vigilancia y control por parte de las CAR para que todos los usuarios registren la información solicitada, de forma completa y verídica y estrategias de sanción para incentivar el pago de la TUA. También es conveniente apoyar la instalación de sistemas de medición en las captaciones de agua con el fin de conocer el consumo real, ya que, si el usuario paga la TUA considerando la concesión y no el consumo, se genera el incentivo a aumentar los niveles de captación en lugar de reducirlos.

Además, el subregistro de información con respecto variables determinantes de la TUA no permite que se calcule correctamente para cada usuario. Se debe recordar que el factor regional depende de las condiciones de la cuenca y de las condiciones socioeconómicas de los usuarios, y, por lo tanto, sino se tiene información sobre estas variables no se puede cobrar la TUA correctamente.

Otra posible causa de la no efectividad de la TUA puede ser que no se encuentre en niveles que verdaderamente incentiven la disminución del consumo. Al igual que ocurre con la TR, si la TUA es baja, el usuario de la captación al hacer el análisis costo beneficio de aumentar el consumo de agua, preferirá aumentarlo. Aun así, no es posible recomendar el aumento de la TUA sin antes realizar un análisis de impacto a la actividad económica. En la Propuesta de Ajuste de Tarifas Mínimas de la Tasa de Uso del Agua MADS (2014) se recomienda que el valor de la TUA debe ser tal que se incentive el consumo racional del agua, se fortalezca el músculo financiero de las CAR, pero que no perjudique la capacidad productiva de los sectores o usuarios más vulnerables del país.

En ese sentido es posible plantear la pregunta de si es conveniente para el país el aplicar una tarifa mínima para la TUA diferenciada por sector económico, que permita aumentar el cobro por TUA en cada sector sin afectar su respectiva productividad. Este tema fue abordado por MADS (2014) en la Propuesta de Ajuste de Tarifas Mínimas de la Tasa de Uso, donde se presenta la posibilidad de aumentar la tarifa mínima diferenciada por sector económico (Tabla 84).

Tabla 84. Tarifa Mínima TUA Propuesta 2014

Uso	Tarifa Mínima Propuesta 2014
Agropecuario	3,6
Hogares	6,16
Otros	9,79

Fuente: MADS (2014)

Comparando con la Tabla 85 se observa que se pretendía aumentar la tarifa mínima en todos los sectores de manera importante, manteniendo al sector agropecuario con la tarifa mínima más baja considerando su especial vulnerabilidad y que es uno de los sectores con menor valor agregado en Colombia. Se pretendía un aumento mayor en la TUA cobrada a los hogares o sector doméstico (acueductos y

tratamientos de agua) y otros sectores que incluye actividades económicas como la minería, la industria, la generación de energía, quienes se considera, tienen una mayor capacidad tecnológica para modificar sus costos por lo que pueden resistir un mayor aumento de la TUA.

Tabla 85. Colombia. Tarifa Mínima TUA 2010-2015

Año	Pesos por metro cúbico (\$/m3)	IPC año anterior (%)
2010	0,68	2
2011	0,7	3,17
2012	0,73	3,73
2013	0,74	2,44
2014	0,76	1,94
2015	0,79	3,66
2016	0,84	6,77
2017	0,89	5,75

Fuente: MADS (2017)

Entonces lo que se buscaba era que los sectores económicos más productivos, es decir, con mayor valor agregado pagarán una mayor parte por el uso del agua. Esta propuesta va acorde a lo mencionado anteriormente sobre el análisis costo beneficio que hace el inversionista teniendo en cuenta la productividad del agua en cada sector económico. En Colombia, además, otros estudios han planteado la necesidad de aumentar la tarifa mínima, algunos de estos se presentan en la Tabla 86.

Tabla 86. Propuesta de Aumento de la TM

Estudio	Año	Propuestas TM (pesos del año referido)
Convenio entre Patrimonio Natural, The Nature Conservancy y el World Wildlife Fund (Rudas, 2009)	2009	[\$3,67 - \$7,35]
Convenio Especial de Cooperación Científica y Tecnológica 13-2008 entre el IDEAM, la Universidad Javeriana y el MAVDT (2010)	2010	[\$1,23 - \$9,88]
Consultoría Ecosimple con el apoyo de la Agencia Alemana de Cooperación Técnica y el MADS (2014)	2014	\$9,79

Fuente: MADS (2016)

Más recientemente, a finales de 2016 el MADS presentó una propuesta para modificar la TUA relacionada con el cálculo del factor regional, el cual pretendía agregar una variable de factor de uso que permita introducir en la TUA las diferencias por actividad económica a la que se destina la captación de agua, específicamente para dos grupos: el primero, actividades agrícolas, pecuarias, acuícolas y generación de energía con un factor de uso de 0,0775 y un segundo grupo con las demás actividades económicas y un factor de uso de 0,4.

Entonces se observa que las propuestas hasta el momento de modificación de la TUA van ligadas a reconocer la necesidad de aumentarla, sin afectar la actividad económica y la productividad de los sectores, por lo que se busca introducir la diferencia por tipos de uso dentro del cálculo de TUA, ya sea con tarifas mínimas diferenciadas o con una variable que introduzca la actividad económica para la que utiliza la captación.

En conclusión, se puede hablar de que la TUA no tiene el impacto esperado sobre las captaciones de agua por cuatro posibles razones:

- La primera es sobre un problema institucional en las CAR, quienes tienen dificultad para aplicar la autoridad sobre los usuarios de captaciones, por lo que hay problemas de subregistro y déficit de recaudo, siendo necesario para las CAR mejorar sus instrumentos de vigilancia, control y sanción. Tanto para contar con una mejor información y calcular el factor regional, que permita cobrar una TUA diferenciada correcta, como incentivar el pago de la TUA por parte de los usuarios.
- La segunda razón está relacionada con una baja medición de los niveles de captación, lo que hace que los usuarios paguen en función de la concesión y no del consumo de agua.
- La tercera razón está relacionada con la pregunta de si los niveles de la tarifa mínima para la calcular la TUA realmente incentivan el consumo racional de agua o si por el contrario son bajos. En este tema se debe evaluar el impacto sobre el aparato productivo del país de aumentar la tarifa mínima.
- La cuarta razón está relacionada con la pregunta si se debe tener en cuenta el tipo de uso para el cálculo de la TUA, ya sea por una tarifa mínima diferenciada, la introducción de una variable referente al tipo de uso en la fórmula de cálculo, u otros métodos.

14 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente diagnóstico permitió identificar de forma general y a nivel sectorial, cuáles son los aspectos claves que se deben considerar a futuro para mejorar la productividad del agua en el marco de la MCV. Los ejes temáticos de este diagnóstico están relacionados a los conceptos de eficiencia – productividad (se analizaron en conjunto), características de los vertimientos, factores que inciden en el funcionamiento de los STAR y reúso del agua. Tomando como base estos conceptos a continuación, se presentan las siguientes conclusiones.

De los indicadores de eficiencia y productividad propuestos, los más utilizados corresponden a los que **relacionan el uso del agua y los beneficios económicos esperados**, en parte esto se explica porque es un indicador que utiliza el Banco Mundial para analizar en términos globales la productividad del agua (el DANE tiene estimaciones para Colombia), sin embargo, este indicador solo da una visión parcial de la productividad, **ya que no está considerando el impacto en las cuencas por la extracción del recurso y tampoco analiza la afectación en términos de calidad.**

Aunque se tienen unos conceptos generales sobre eficiencia y productividad del agua, **éstos deben ser analizados de forma independiente de acuerdo al sector económico**, por ejemplo, hablar de eficiencia en el sector agrícola o pecuario donde el uso del agua es indispensable para los cultivos o para la crianza de animales, es diferente a la eficiencia en el sector industrial manufacturero y minero, en donde no se presenta un requerimiento mínimo de agua, sino que está **en función de cuánta agua se usa por unidad productiva**. Esta situación conlleva a que no sea recomendable comparar la eficiencia y productividad del agua entre sectores económicos. También se identificó que ambos conceptos, se analizan principalmente en función del uso del agua (volumen), para el caso de Colombia, **se debe considerar el desarrollo conceptual, metodológico y de captura de información de indicadores que den cuenta de la eficiencia y la productividad no solo en volumen, sino también en términos de la calidad del recurso que permitan analizar estos conceptos en función de las características de los vertimientos y del impacto generado sobre los recursos hídricos.**

Esta situación lleva a pensar que cualquier indicador que se defina para analizar la eficiencia y productividad del agua, **debe considerar las restricciones hídricas de las cuencas como un factor limitante para el desarrollo de los sectores económicos en términos de oferta y calidad.** A su vez, considerando que el cambio climático y la variabilidad climática son una realidad, **éstos también deben ser considerados en los análisis sectoriales**, identificando principalmente la incidencia de estos fenómenos climáticos en la productividad del agua.

Con relación a lo anterior, se identificó que **ciudades como Bogotá, Cali, Barranquilla y Cartagena, que representan aproximadamente el 34,3% del PIB de Colombia y una población aproximada de 13 millones de habitantes, se encuentran en las SZH con las mayores restricciones hídricas**, lo cual las hace más vulnerables ante los escenarios de cambio climático propuestos por el IDEAM. Esto indica que a futuro se puede afectar considerablemente la economía del país ante eventos cada vez más extremos de precipitaciones (inundaciones) y aumentos en la temperatura (sequías).

La diversidad de condiciones ambientales, sociales, económicas y culturales al interior de cada uno de los sectores económicos, influyen en los métodos y técnicas productivas de cada sector, los cuales a su vez

tienen un efecto en la eficiencia y productividad del agua en Colombia. Esto determina en gran medida el modo en que el productor, especialmente pequeños y medianos, emplean el recurso hídrico, los cuales tienen menos posibilidades de acceso a nuevas y mejores tecnologías, e innovaciones, ni acceso a mercados que garanticen ingresos más altos para mejorar la gestión del recurso hídrico en los procesos productivos.

Las condiciones ambientales como por ejemplo los diferentes climas y tipos de suelos, condicionan las necesidades de agua en las actividades económicas lo cual también incide en la eficiencia y productividad del agua. **En los sectores agrícola y pecuario esta incidencia es clara dado que los requerimientos hídricos de las plantas y animales están altamente influenciados por la temperatura y la humedad.**

Se debe reconocer que en las zonas rurales y en algunas zonas urbanas no existe una cultura de pago por el uso del agua, existe una visión generalizada de una alta oferta hídrica en el país y por lo general se tiene la concepción de que el recurso hídrico se encuentra disponible. Mediante el método de la encuesta Delphi y comité consultivo a expertos, se constató que uno de los aspectos que impulsarían **la implementación de métodos de uso eficiente, de reúso o uso de fuentes alternativas en la producción, sería generar conciencia sobre la posibilidad de un escenario de escasez de agua.**

Una de las principales causas de las bajas eficiencias en el uso del agua, se debe a las pérdidas en los sistemas, tanto pérdidas técnicas como comerciales. Esta baja eficiencia no solo se presenta en los sistemas de distribución de agua potable sino también en los distritos de riego. La tendencia general que se reconoce a nivel nacional e internacional para disminuir los niveles de pérdidas de agua es **reevaluar el uso de indicadores porcentuales** que reflejen el volumen de agua perdida, que permitan la comparación entre los diferentes sistemas de distribución.

En cuanto a los vertimientos de agua generados en los sectores económicos, éstos presentan diferencias y retos importantes, por ejemplo, en el caso del sector agrícola y pecuario por su naturaleza **se presentan vertimientos de tipo difuso**, los cuales son de difícil recolección y tratamiento. En el caso del sector industrial manufacturero, el gran reto está enfocado en garantizar **que los sistemas de tratamiento sean los adecuados para las características de los vertimientos de acuerdo con la actividad que desarrollen**. En el sector minero, caracterizado por el vertimiento de metales pesados, los sistemas de tratamiento **deben garantizar la remoción de estos acordes a los criterios de calidad.**

Uno de los retos que afronta el país es **aumentar tanto la cobertura de los sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales como también mejorar y optimizar los sistemas existentes, fomentar el uso de tecnologías apropiadas de acuerdo con la cantidad y calidad de los afluentes** y mejorar la capacidad técnica de los operarios de los sistemas, para así garantizar que las aguas residuales sean tratadas eficientemente antes de ser vertidas a las fuentes hídricas. También es importante **migrar a tecnologías de tratamiento más actualizadas que estén acordes a los requerimientos de calidad del agua de estándares nacionales e internacionales.**

Como factor clave en el uso eficiente del agua y en el manejo de los vertimientos, la normativa en Colombia cuenta con instrumentos económicos que tienen como función reducir la presión sobre el recurso hídrico. En el caso de la TR, herramienta para reducir la carga contaminante asociada a DBO y SST, se ha identificado en algunos estudios que puede tener un impacto significativo en la reducción de la carga de vertimientos a escala local. Sin embargo, es necesario hacer que esta herramienta tenga un mayor impacto en la protección del recurso hídrico, por lo que se debe reestructurar en función de lo

siguiente: **considerar modelos de cálculo de la TR que tengan en cuenta las características de los vertimientos sectoriales**, por ejemplo, en el sector minero incluir en la tarifa parámetros asociados a los metales pesados. Esta situación también es relevante para el sector industrial manufacturero donde se presentan diferentes características de los vertimientos de acuerdo con la actividad industrial que se desarrolle. **Otro aspecto a tener en cuenta es la capacidad de las autoridades ambientales para hacer efectivo el cobro de la TR**, según el informe de la Contraloría 2015 – 2016, la efectividad en el cobro de la TR en el periodo 2010 – 2015 fue del 43%. En tercer lugar, modificar el modelo de cálculo de la TR para que efectivamente cumpla su objetivo de reducir la carga contaminante, esto significa que **los recursos captados sean los suficientes para mantener las fuentes hídricas en condiciones de calidad adecuadas**.

El reúso del agua en Colombia, aunque se tenía definido desde la Ley 373 de Uso Eficiente y Ahorro del Agua, solo hasta el año 2014 se reglamentó para dos **actividades agrícola (con restricciones) e industrial**. A nivel mundial se han identificado casos donde se hace reúso de agua en **todos los sectores (doméstico, minero, pecuario)**, por lo tanto, se debe abrir el panorama para que en Colombia todos los sectores puedan implementar esta estrategia que tiene dos impactos positivos directos sobre el recurso hídrico: disminuye la presión sobre la extracción de fuentes hídricas superficiales y subterráneas; y en segundo lugar se reduce la carga de vertimientos. **Adicionalmente, la normativa no define un esquema de incentivos que promuevan el reúso del agua**, esto se convierte en un factor clave para que los sectores económicos apliquen estas estrategias en sus procesos productivos.

Un problema generalizado en diferentes estudios y espacios participativos **es el déficit de información tanto en registros como en la calidad de los mismos para todos los sectores económicos**. En el caso del sector agrícola, se tiene por ejemplo, diferencias en las áreas de cultivo de riego según diferentes fuentes consultadas y se desconoce información base como los volúmenes de agua empleados en el riego, en el sector de agua potable hay deficiencias en la información suministrada por las empresas prestadoras de servicios públicos en cuanto a las pérdidas en cada uno de los componentes del sistemas, en la minería se desconoce el uso de agua con relación al tipo de mineral explotado y a las formas de extracción, en el caso del sector industrial manufacturero no se cuenta con información del agua usada en cada una de las fases del proceso productivo, además existe un subregistro de las empresas que deberían reportar información al RUA. Adicionalmente, también se presentan dificultades con información sobre los sistemas hídricos en especial al de aguas subterráneas. Esto dificulta cualquier ejercicio de planificación territorial, ya que no se cuenta con los elementos necesarios para tomar las medidas pertinentes.

15 BIBLIOGRAFÍA

- ADR. (2017). *Especificaciones técnicas generales para proyectos y distritos de adecuación de tierras*. Bogota D.C.
- AIDIS. (2016). Uso seguro del agua para el reúso.
- Alata Olivares, N. (2005). *Efecto de la adopción del riego por goteo en maíz forrajero sobre la gerencia de empresas agropecuarias en la irrigación majes*.
- Ali, M. H., & Talukder, M. S. U. (2008). Increasing water productivity in crop production-A synthesis. *Agricultural Water Management*, 95(11), 1201–1213. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.008>
- Alkaya, E., & Demirer, G. N. (2015). Water recycling and reuse in soft drink/beverage industry: A case study for sustainable industrial water management in Turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 172–180. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.749007>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & W, A. B. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. *Irrigation and Drainage*, 1–15.
- Althausen, M. (2016). Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio- Convertir un residuo en un recurso. *Palmas*, 37(Especia), 31–37.
- AMB. (2016). Informe de gestión 2016 - Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
- AMBEV. (2012). 9ª Edição Prêmio FIESP de Conservação e Reuso de Água, (11).
- AMVA - UPB. (2010). *Guía Metodológica para determinar Módulos de consumo y factores de vertimiento de agua*. Medellín.
- Aquapolo. (2013). Inscrição Do Projeto Aquapolo Na 8ª Edição Do Prêmio Fiesp De, 1–11.
- Asociación Colombiana de Porcicultores. (2014). *Informe de los proyectos de inversión desarrollados durante el primer semestre de 2014*. Bogotá D.C.
- Australian Water recycling Centre of Excellence. (2014a). Project Report Global Potable Reuse Case Study 3 : NEWater, Singapore.
- Australian Water recycling Centre of Excellence. (2014b). Project Report Global Potable Reuse Case Study 3 : Windhoek , NEWater, Singapore.
- Australian Water Recycling Centre of Excellence. (2014). Project Report Global Potable Reuse Case Study 2 : Upper Occoquan Service Authority.
- AVON. (2016). Reúso de Efluentes e Comissão Interna de Conservação da Água da Unidade de Interlagos.
- Banco Mundial. (2014). *Extracción anual de agua dulce para uso agrícola (% del total de extracción de agua dulce)*.
- Barker, R., Dawe, D., & Inocencio, A. (2003). Economics of water productivity in managing water for agriculture. *Water Productivity in Agriculture ...*, (April 2014), 19–35. <https://doi.org/10.1079/9780851996691.0019>
- Bastiaanssen, W., Karimi, P., Rebelo, L. ., Duan, Z., Senay, G., Muthuwatte, L., & Smakhtin, V. (2014). Earth Observation Based Assessment of the Water Production and Water Consumption of Nile Basin Agro-Ecosystems. *Remote Sensing*, 6, 10306–10334.
- Bavaria. (2015). *Informe de desarrollo sostenible 2015*.
- Boletín de Noticias. (2017). AMB con el más bajo índice de pérdidas en Colombia.
- Brissaud, F. (n.d.). Wastewater reclamation and reuse in france. *October*.
- Camacho, L. A. (2017). *Problemática de la Contaminación Hídrica del Río Bogotá –Posibles escenarios de crisis y soluciones –Visión prospectiva*. Bogota D.C.
- Cárdenas, R. C., & Ortiz, J. E. (2014). Manejo Integrado Del Recurso Agua, En El Proceso De Beneficio

- Húmedo Del Café, Para La Asociación De Productores De Café Especial "Acafeto" En El Municipio De Fresno, Departamento Del Tolima., 147.
- Casas F, A. M. (2012). Estimación del consumo requerido de agua para un subsector del sector agroalimentario de la ciudad de Bogotá, 83–84.
- Castrillón Quintana, O., Jiménez Pérez, R. A., & Bedoya Mejía, O. (2004). Porquinaza en la alimentación animal. *Revista Lasallista De Investigacion*, 1(1), 1–5.
- CEPAL. (2015). *Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe*. Santiago.
- CEPAL, & DNP. (2014). Diagnóstico y prospectiva de la adecuación de tierras en Colombia. Bogotá D.C.
- Chao Espinosa, R., Sosas Caceres, R., & Díaz Capdesuñer, Y. (2012). Gasto de agua de limpieza y tratamiento del residual en naves de ceba porcina. (Spanish). *Water Use for Cleaning Pens and Wastewaters Treatment in Fattening Pigs Production. (English)*, 21(3), 69–72.
- Clement, F., Haileslassie, A., Blümmel, M., & Samad, M. (2011). Enhancing Water Productivity for Poverty Alleviation: Role of capitals and institutions in the Ganga Basin. *Experimental Agriculture*, 47(December 2010), 133–151. <https://doi.org/10.1017/S0014479710000827>
- CNPML. (2002). Casos de aplicación de producción más limpia en Colombia.
- CODELCO. (2015). Reporte de sustentabilidad 2015. Chile.
- Contraloría General de la República. (2016a). Actuación Especial Minería Ilegal. Bogotá D.C.
- Contraloría General de la República. (2016b). Informe sobre el estado de los Recursos Naturales y del Ambiente 2015 - 2016. Bogotá D.C.
- CORANTIOQUIA. (n.d.). Tecnologías limpias y apropiadas de tratamiento de aguas para la reducción de cargas contaminantes que permitan dar cumplimiento a la Resolución 631 de 2015. Medellín.
- Cortés Bello, C. A. (2013). Uso del modelo Aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle de Cauca, 62.
- Corujo, B. (2016a). PROYECTO DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN. *Perspectivas En Asuntos Ambientales*, 68–72.
- Corujo, B. (2016b). PROYECTO DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN PORQUERIZAS, 68–72.
- CRA. (2013). *Nivel de pérdidas aceptable para el cálculo de los costos de prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado. Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Bogotá D.C., Colombia.
- CRA. (2014). Documento de trabajo proyecto general - Marco Tarifario para los servicios públicos de Acueducto y Alcantarillado Nivel de pérdidas aceptable Julio de 2014.
- CRA. (2015a). *Documento de trabajo proyecto general. RANGO DE CONSUMO BÁSICO. Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Bogotá D.C., Colombia.
- CRA. (2015b). Documento por el cual se recopila en un solo texto, la Resolución CRA 688 de 2014 y Resolución CRA 735 de 2015.
- CTA, IDEAM, COSUDE, & GSI-LAC. (2015). *Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014*. Medellín.
- DANE. (2012, October). La estructura de la producción de carne bovina en Colombia. *Boletín Mensual Insumos Y Factores Asociados a La Producción Agropecuaria*, 1–7.
- DANE. (2013a). *Encuesta Ambiental Industrial - EAI 2013p (provisional). Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Bogotá D.C.
- DANE. (2013b). *Encuesta Anual Manufacturera - EAM 2013. Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Bogotá D.C.
- DANE. (2013c, December). Levante y cebo de cerdos: etapas de una industria en continuo crecimiento. *Insumos Y Factores Asociados a La Producción Agropecuaria*, 60.
- DANE. (2014a). *Encuesta Ambiental Industrial - EAI 2014 (definitiva). Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Bogotá D.C.

- DANE. (2014b). *Encuesta Anual Manufacturera - EAM 2014. Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Bogotá D.C.
- DANE. (2015a). *Encuesta Ambiental Industrial - EAI 2015p (provisional). Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Bogotá D.C.
- DANE. (2015b). *Encuesta Anual Manufacturera - EAM 2015. Departamento Administrativo Nacional de Estadística*.
- DANE. (2016). *Tercer Censo Nacional Agropecuario. Hay campo para todos. La mayor operación estadística del campo colombiano en los últimos 45 años. Tomo 2. Resultados*. (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Ed.). Bogotá D.C.
- DANE, D. A. N. de E. (2017). *Boletín técnico Cuenta Ambiental y Económica de Flujo de Agua, en unidades físicas Boletín técnico*.
- DANE, D. A. N. de E., & IDEAM, I. de H. M. y E. A. (2015a). *Hacia la construcción de la cuenta del agua a nivel nacional*. Bogotá D.C.
- DANE, & IDEAM. (2015b). *Hacia la construcción de la cuenta del agua a nivel nacional*. Bogotá D.C.
- DANE, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, & SIPSA. (2012). *Boletín mensual: INSUMOS Y FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA*.
- Departamento Nacional de Estadísticas, D. (2016). *Relación de indicadores generados a partir de las cuentas ambientales y económicas*.
- Departamento Nacional de Estadísticas, D. (2017). *Hoja metodológica de indicadores Productividad hídrica*.
- Departamento Nacional de Planeación DNP. (n.d.). *Plan director aguas residuales en Colombia*.
- Departamento Nacional de Planeación DNP. (2015). *Evaluación de operaciones de las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, que mida la capacidad con la que cuentan para lograr sus objetivos y proponer acciones de mejora para el fortalecimiento integral de las mismas y el mejoramiento*. Bogotá D.C.
- Departamento Nacional de Planeación DNP. (2016). *Crecimiento Verde para Colombia. Elementos Conceptuales y Experiencias Internacionales*. Bogotá D.C.
- Departamento Nacional de Planeación DNP. (2017a). *Análisis de información técnica y cartográfica para identificar zonas prioritarias para aumentar la productividad del uso del agua en los principales sectores usuarios*. Bogotá D.C.
- Departamento Nacional de Planeación DNP. (2017b). *Misión de Crecimiento Verde*.
- Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente - DAMA. (2004). *GUÍA AMBIENTAL PARA EL SECTOR CURTIEMBRES, 11, 21*.
- Department of Water and Sanitation, & Africa, C. of M. of S. (2014). *Targets for Water Conservation / Water Demand Management in the Mining Sector Key Indicators, Methodologies to Set Targets and Commodity-based Targets*. South Africa.
- Descheemaeker, K., Bunting, S. W., Bindraban, P., Muthuri, C., Molden, D., Beveridge, M., ... Jarvis, D. I. (2013). *Increasing Water Productivity in Agriculture. Managing Water and Agroecosystems for Food Security, 10*, 104–123. <https://doi.org/10.1079/9781780640884.0104>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), & VAG-Armaturen GmbH. (2011). *Guía para la reducción de las pérdidas de agua*.
- DNP. (n.d.). *Plan Director de Aguas Residuales en Colombia. Departamento Nacional de Planeación*. Bogotá D.C.
- DNP. (2014). *Plan Nacional de Desarrollo 2014 - 2018. Todos por un nuevo país. Departamento Nacional de Planeación*. Bogotá D.C.
- DNP. (2016). *Evaluación del Programa Nacional de Adecuación de Tierras (PRONAT)*. Bogotá D.C.
- DNP, & MAVDT. (2005). *Documento Conpes 3383 - Plan de Desarrollo del Sector de Acueducto y*

- Alcantarillado. *Documento Conpes 3383*, 25.
- Duarte, E. (2011). Uso del Agua en establecimientos agropecuarios. Planificación del sistema de abrevadero. *Revista Plan Agropecuario*, 140(Parte II), 38–43.
- Echeverry, A. (2011). *Reúso para riego del efluente de la PTAR-C: Evaluación del potencial impacto en las propiedades físicas del suelo y la productividad de la variedad de caña de azúcar CC85-92*. Universidad del Valle.
- Eduardo Chaparro A. (2007). *Buenas prácticas en la industria minera: el caso del grupo Peñoles en México. Serie: Recursos naturales e infraestructura*. Santiago de Chile.
- Esandi, J., Sartor, A., & Schmidt, P. (2013). EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD EN EL REUSO DE AGUAS CON DESTINO INDUSTRIAL.
- Escuela Organización Industrial- Sevilla. (2008). Máster Profesional en Ingeniería y Gestión Medio Ambiental. Contaminación de las aguas. Vertidos de la elaboración y envasado de cervezas, 1–12.
- FAO. (2002). *Agua y Cultivos-Logrando el uso óptimo del agua en el agricultura*.
- FAO. (2006a). *La larga sombra del ganado*. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- FAO. (2006b). Livestock's long shadow - environmental issues and options. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://doi.org/10.1007/s10666-008-9149-3>
- FAO. (2013a). Guidelines to control water pollution from agriculture in China.
- FAO. (2013b). *Reutilización del agua en la agricultura : ¿Beneficios para todos?*
- FAO. (2014). Ganado y Producción animal.
- FAO. (2017). *Consumo de fertilizantes (kilogramos por hectárea de tierras cultivables)*.
- Fedearroz. (2014). Discurso instalación. XXXIV Congreso Nacional Arrocero.
- Fedesarrollo, C. de investigación económica y social. (2016). *Evaluación de potencial de crecimiento verde para Colombia (GGPA)*.
- FEMSA. (2016). 11º Prêmio Conservação e Reúso da Água.
- FENAVI. (n.d.). *Guía Rápida. Consideraciones técnicas para gestión integral de recurso hídrico en granjas avícolas*. Bogota D.C.
- FENAVI. (2014). Guía ambiental para el subsector avícola. Bogotá D.C.
- FIESP. (2017). PRÊMIO CONSERVAÇÃO E REÚSO DA ÁGUA.
- FONADE, & IDEAM. (2013). Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sector. *Cambios Climáticos*, 0–49.
- FUNDES. (2001). Guía de Buenas Prácticas para el Sector Textiles. *Fundes*.
- FUNDES. (2010). Guía de Buenas Prácticas para el Sector Galvanotécnica, 87.
- Galarza, M., & Rudas, G. (2009). Análisis De La Efectividad De Las Tasas Retributivas En Colombia. Estudio De Caso, 71.
- García, F. O., & González, M. F. (2015). Consumo de fertilizantes en el mundo y en la Argentina, 61–84.
- Gerber, P., & Menzi, H. (2006). Nitrogen losses from intensive livestock farming systems in Southeast Asia: A review of current trends and mitigation options. *International Congress Series*, 1293, 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.ics.2006.01.028>
- GIA, UPB, & AMVA. (2005). Reuso de aguas de proceso.
- Gomez Daza, E. (2012). Estudio De Gestion Ambiental Para La Empresa Avicola Agricola Mercantil Del Cauca-Agricca S.a. *Universidad de Manizales*, 173.
- Goverment, A. (2013). Australian Water Recycling Centre of Excellence.
- Guzman, A., & Ospina, S. (2016). Proyecciones de Flujos de Agua Virtual de Siete Productos Agrícolas de Colombia 2013-2022: una Aplicación de la Dinámica de Sistemas y la Economía Compleja. *Cátedra Del Agua*, 37–50.
- Hernández, M. T., Sanz, L., & Mancebo, J. A. (2014). Tratamiento de bajo coste para aguas contaminadas por actividades de minería. *Diseño Y Tecnología Para El Desarrollo*, 1, 131–145.

- Hertle, C., Driel, E. Van, Kinder, M., & Leinster, D. (n.d.). Water Recycling in the Australian Food & Beverage Industry A Case Study – Reduced Environmental Footprint.
- Hespanhol, I. (n.d.). POTENCIAL DE REUSO DE ÁGUA NO BRASIL -AGRICULTURA, INDUSTRIA, MUNICIPIOS, RECARGA DE ACUÍFEROS.
- Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual Water Trade. In *International Expert Meeting on Virtual Water Trade* (Vol. 12, pp. 1–244).
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E., & Richter, B. D. (2012). Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability. *PLoS ONE*, 7(2).
- ICA. (2016). *Censo Pecuario Nacional*. Bogotá D.C.
- ICMM. (n.d.). *Shared Water, Shared Responsibility, Shared Approach: Water in the Mining Sector*. London.
- ICMM. (2017). *A practical guide to consistent water reporting*. London.
- IDEAM. (2010a). *Estudio Nacional del Agua - ENA, 2010*.
- IDEAM. (2010b). Índice de alteración potencial de la calidad del agua (hoja metodológica). Bogotá.
- IDEAM. (2014a). *Estudio Nacional del Agua. Estudio Nacional del Agua 2014*.
- IDEAM. (2014b). Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través del análisis de componentes principales (ACP). Bogotá.
- IDEAM. (2015a). *Estudio Nacional del Agua, ENA 2014*. Bogotá.
- IDEAM. (2015b). *Estudio Nacional del Agua - ENA, 2014*. Bogotá D.C.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá D.C.
- IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA. (2017a). *Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá D.C.
- IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELLERÍA. (2017b). *Tercera Comunicación Nacional de Colombia a La Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM*. Bogotá D.C.
- IFPRI. (2009). Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. *Política Alimentaria. Informe*, 1–30. <https://doi.org/10.2499/0896295370>
- INAT. (2003). *Guía ambiental para la construcción y operación de proyectos de adecuación de tierras (distritos de riego y/o drenaje)*. Bogotá D.C.
- Industrias Peñoles Peñoles SAB de CV. Informe de Desarrollo Sustentable (2016).
- Ingenio Pichichi. (2016). Informe de sostenibilidad 2016.
- Institucionalidad. (n.d.).
- Lasso, J., & Ramírez, J. L. (2011). Perspectivas generales del efecto del reúso de aguas residuales para riego en cultivos para la producción de biocombustibles en Colombia. *El Hombre Y La Máquina*.
- Lenton, R. (2013). Innovations to Improve Water Productivity – Reflections. *Aquatic Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.aapro.2013.07.015>
- M.C. Miguel Escamilla López, Dr. Jorge Meza Jiménez, M.A. Ricardo Llamas Cabello, C. P. M. S. L. (2013). Análisis Económico para la Recuperación de las Aguas Residuales de un Proceso Minero. *Conciencia Tecnológica*, 45, 18–23.
- MADS. (2004a). *Decreto 155 De 2004*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- MADS. (2004b). *Decreto 3100 de 2003*.
- MADS. (2012). DECRETO 2667 de 2012.
- MADS. (2014). *Propuesta de Ajuste de Tarifas Mínimas de la Tasa por Utilización de Agua*.
- MADS. (2016). *Propuesta de Reglamentación de la Tasa por Utilización de Aguas*.

- MADS. (2017). *Tasas por Utilización de Aguas 2004-2017*.
- MADS, & ANDESCO. (2013). Pacto por el uso eficiente y ahorro del agua. Resultados año 2013 y plan de trabajo 2014. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MADS, MHCP, & COLCIENCIAS. (2013). *Estudio sobre la efectividad de impuestos, tasas, contribuciones y demás gravámenes existentes para la preservación y protección del ambiente, así como de la identificación y viabilidad de nuevos tributos por la emisión de efluentes líquidos, gases cont.*
- Mafla, E., Cabezas, D., & Carrasco, F. (2002). El riego, la producción y el mercado. In *Programa de capacitación a promotoras y promotores campesinos* (p. 195). Quito.
- Martinez, A., & Sanchez, J. (2007). Necesidades de agua en el ganado vacuno de leche. *Engormix*.
- Martínez Gaspar, F., Ojeda Barrios, D., Hernández Rodríguez, A., Martínez Tellez, J., & De la O Quezada, G. (2011). El exceso de nitratos: un problema actual en la agricultura. *Universidad Autónoma de Chihuahua*, 11–16.
- MAVDT. (2002). Guía Ambiental para el Subsector Porcícola. *Atención Primaria*, 102. <https://doi.org/10.1157/13068212>
- MAVDT, & DNP. (2007). Documento Conpes 3463 - PLANES DEPARTAMENTALES DE AGUA Y SANEAMIENTO PARA EL MANEJO EMPRESARIAL DE LOS SERVICIOS DE ACUEDUCTO, ALCANTARILLADO Y ASEO MINISTERIO.
- MAVDT, & SAC. (2002). Guía Ambiental para el Subsector de Caña de Azúcar. *Guía Ambiental Para El Subsector de Caña de Azúcar Versión*, 32.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Resolución 1207 de 2014. Bogotá D.C.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MinAmbiente. (2010). *Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11- Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposic.* Colombia, Colombia.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000a). Reglamento del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS 2000. Título A. Aspectos generales de los sistemas de agua potable y saneamiento básico. Bogotá D.C.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000b). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS 2000. Título E. Tratamiento de aguas residuales.
- Ministerio de Minas. (2015). *Consumo de agua en la minería del cobre*. Santiago de Chile.
- Ministerio de Minas y Energía. (n.d.). Regalías. Bogotá D.C.
- Ministerio de Minas y Energía. (2011). Tecnologías limpias para eliminar el uso del mercurio en los procesos de beneficio del oro. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. (2012). Censo Minero Departamental 2010-2011. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). Aplicación de prácticas limpias que optimicen el proceso de extracción de oro por barequero en el territorio nacional. Bogotá D.C.
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). *Política minera de Colombia. Bases para la minería del futuro. Minminas*. <https://doi.org/10.1128/JB.187.23.8156>
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2015). *Glosario Técnico Minero*. Bogotá D.C. Retrieved from <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/GLOSARIO+MINERO+FINAL+29-05-2015.pdf/cb7c030a-5ddd-4fa9-9ec3-6de512822e96>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Guía de ahorro y uso eficiente del agua*. Bogotá.
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A., & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4), 528–535. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023>

- Naciones Unidas. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo*.
- National Academy of Sciences. (2012). *Water reuse Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply Through Reuse of Municipal Wastewater*.
- Noyola, A. et al. (2012). Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. *Clean Soil Air Water*, 40, 926–932.
- Núñez, A. (2015). *Manual del cálculo de eficiencia para sistemas de riego*. Lima.
- Nutresa. (2014). CEO Water Mandate 2014.
- OCDE. (2011). *Hacia el crecimiento verde. Un resumen para los diseñadores de políticas*.
- Olmeda, J. M. (2006). El agua y su análisis desde una perspectiva económica: una aplicación para crecimiento económica (pp. 1–21). Alicante: VIII Reunión de Economía Mundial.
- Olvera-Salgado, M. D., Bahena-Delgado, G., Alpuche-Garcés, Ó., & García-Matías, F. (2014). La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos . Estudio de caso en Chihuahua , México. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.AyD18-35.trea>
- ONU. (2003). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Estado de los Recursos Hídricos en el Mundo. Agua para Todos Agua para la Vida. Water* (Vol. 3).
- ONU. (2015). Objetivo 6 Agua Limpia y Saneamiento.
- ONU. (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Agua y Empleo*.
- OPS. (1999). *Agua y Salud*.
- Ospina R., C., Montoya A., J. A., & García P., J. A. (2007). Oportunidades de producción más limpia en tintorerías del sector textil. *Scientia et Technica*, 37(XIII), 6. <https://doi.org/10.22517/23447214.4193>
- Paéz, M. (2008, June). Flores más limpias. *Unimedios*, p. 7.
- País. (2016). Empieza a regir nuevo marco tarifario de acueducto y alcantarillado.
- Peden, D., Tadesse, G., Misra, a. K., Ahmed, F. a., Astatke, A., Ayalneh, W., ... Yimegnuhal, A. (2007). Water and livestock for human development. *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, 485–514. <https://doi.org/10.4324/9781849773799>
- Pimienta, J. P. (2013). Guía Metodológica para la Elaboración de Programas de Optimización de Sistemas de Acueducto.
- Pirelli. (2012). Pirelli Pneus Ltda Unidade Campinas.
- Postobón. (2015). *Informe de sostenibilidad 2015*.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA. (2008). Módulo 3 El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala. Nairobi.
- Quipuzco Ushñahua, L. E. (2004). Valoración De Las Aguas Residuales En Israel Como Un Recurso Agrícola : Consideraciones a Tomar En Cuenta Para La Gestión Del Agua En El Perú, 7(13), 64–72.
- Ramírez, C., Oliveros, C., & Sanz, J. (2015). Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de beneficio húmedo del café. *Cenicafé*, 66(1), 46–60.
- Red Interamericana de Academias de Ciencias - IANAS y el Foro Consultivo Científico y Tecnológico -AC. (2012). Diagnóstico del Agua en las Américas, Capítulo Una visión al estado del Recurso Hídrico en Colombia. México.
- Renault-Sofasa. (2015). Informe de Sostenibilidad, 50.
- Restrepo, M. (2006). Producción mas limpia en la Industria Alimentaria. *Clearn Production*, 1, 15.
- Reta Sánchez, D., Figueroa, U., Faz, R., Núñez, G., Gaytán, A., Serrato, S., & Payán, J. (2010). Sistemas de producción de forraje para incrementar la productividad del agua, 33(1), 83–87.
- Rodríguez, J. ., García, C. ., & Pardo, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46). <https://doi.org/10.14483>

- Rodríguez, J., Mañunga, T., & Cárdenas, C. (2012). INFLUENCIA DE LAS FRACCIONES DE MATERIA ORGÁNICA SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE UNA INDUSTRIA PAPELERA, 447–455.
- Rodríguez, J. P., García, C., & Beltran, J. S. (n.d.). *Planificación Ambiental Hídrica Estacional: Función de costos mediante análisis multivariado para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*.
- Rudas, G. (2005). Comentarios sobre concesiones y permisos, tasas ambientales e instrumentos financieros en la legislación del agua, 1–8.
- Rudas, G. (2008). Instrumentos Económicos en la Política del Agua en Colombia: Tasas por el uso del agua y tasas retributivas por vertimientos contaminantes, (2000), 1–12.
- SAGARPA. (2016). Uso de fertilizantes. *Secretaría de Desarrollo Rural*, 11.
- Salas, D., Zapata, M. A., & Guerrero, J. (2007). Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la región. *Scientia et Technica*, (37), 591–596.
- Salinas Ramírez, J. M. (2011). Retos a futuro en el sector de acueducto y alcantarillado en Colombia, 31.
- Seah, H., & Woo, C. H. (2012). The Multi-barrier Safety Approach for Indirect Potable Use and Direct Nonpotable Use of NEWATER Singapore-NEWater, 99–101.
- Serrano Jiménez, P. G., Lucena Marotta, J. J., Ruano Criado, S., Nogales García, M., López Bellido, L., Betrán Aso, J., ... Pérez Rodríguez, J. (2009). *Guía Práctica de la Fertilización Racional de los Cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura . *Agronomía Colombiana*.
- Sociedad de Agricultores de Colombia - SAC. (2002). Guía ambiental para el subsector porcícola. Bogotá D.C.
- SSPD. (2012). *Cartilla de Servicios Públicos para las Entidades Territoriales*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Bogotá D.C.
- SSPD. (2014a). *Estudio Sector Acueducto y Alcantarillado Estrategia Nacional de Infraestructura*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Bogotá D.C.
- SSPD. (2014b). Informe Sectorial Pequeños Prestadores.
- SSPD. (2014c). Informe Técnico sobre Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia.
- SSPD. (2015). *Informe sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado. Grandes prestadores*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.
- SSPD. (2017). Sistema único de información de servicios públicos - SUI.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. *Livestock's long shadow: environmental issues and options*.
- Superintendencia de Industria y Comercio. (2013). Estudios Económicos Sectoriales: Estudio sobre Fertilizantes en Colombia, (6), 201.
- Tapasco, J., Martínez, J., Calderón, S., Romero, G., Ordoñez, D. A., Álvarez, A., ... Ludeña, C. E. (2015). *Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: sector ganadero*. Washington, D.C.
- Teck. (2013). *Informe de sustentabilidad 2013*. Chile.
- Tejada, C., Quiñones, E., & Peña, M. (2014). Contaminantes Emergentes En Aguas: Metabolitos De Fármacos. *Universidad Militar Nueva Granada*, 1–48. <https://doi.org/10.18359/rfcb.341>
- The Stakeholder Accord on Water Conservation. (2009). *Guideline for Baseline Water Use Determination and Target Setting in the Mining Sector*. Pretoria.
- Tornés Olivera, N., Brown Manrique, O., Gómez Masjuan, Y., & Guerrero Alega, A. M. (2016). Evaluación del modelo AquaCrop en la simulación del crecimiento del cultivo del frijol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 23–30.
- Trujillo, A., Cárdenas de Flores, C. H., Valbuena, M., Herrera, L., Araujo, I., & Saules, L. (1996). I-193 -

- tratamiento de aguas residuales en el tropico mediante lagunas de estabilización y su reuso para riego agrícola, (1), 1–6.
- Tuong, P., Bouman, B. A. M., & Mortimer, M. (2005). More Rice, Less Water—Integrated Approaches for Increasing Water Productivity in Irrigated Rice-Based Systems in Asia. *Plant Production Science*, 8(3), 231–241. <https://doi.org/10.1626/ppp.8.231>
- UNESCO. (2006). Water a shared responsibility The United Nations World Water Development Report 2. New York.
- UNESCO. (2016). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y empleo. París.
- UNESCO-IHE Institute for Water Education. (2009). *Biological Wastewater Treatment Online Course: Principles, Modeling and Design*.
- UNGRD. (2016). *Fenómeno El Niño: Análisis Comparativo 1997-1998//2014-2016*.
- Unicef. (2006). El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. *La Infancia, El Agua Y El Saneamiento Básico En Los Planes de Desarrollo Departamentales Y Municipales.*, 31–56.
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2007). *Producción más limpia en la minería del oro en Colombia mercurio, cianuro y otras sustancias. Unidad de Planeación Minero Energética UPME*. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2014a). *Estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro Tomo 2*. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2014b). *Indicadores de la minería en Colombia - Versión preliminar*. Bogotá D.C.
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2015a). *Guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón*. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2015b). *Guía para la elaboración del programa de uso eficiente y ahorro del agua en la minería de metales preciosos y carbón PUEAA*. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2015c). *Incidencia Real de la Minería del Carbón, del Oro y del Uso del Mercurio en la Calidad Ambiental con Énfasis Especial en el Recurso Hídrico-Diseño de Herramientas para la Planeación Sectorial*. Bogotá. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2016). *Aproximación metodológica y conceptual a la evaluación de la huella hídrica en el sector minero colombiano*. Bogotá.
- UNIDO. (2007). *Technology Foresight Summit 2007 Main Report*, (September), 38.
- United States Environmental Protection Agency EPA. (2012). *Guidelines for Water Reuse*. Washington, D.C.
- Universidad Industrial de Santander UIS. (2014). *Estimación de áreas intervenidas, consumo de agua, energía eléctrica y costos de producción en la actividad minera*. Bogotá.
- University of Nebraska foundation. (2017). *University of Nebraska Foundation*.
- UPME. (2007). *Plan energético nacional 2006-2025*. Bogota D.C.
- UPRA. (2015). *Distritos de adecuación de tierras - Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria – SIPRA*. Bogotá D.C.
- Urrutia Cobo, N. (2006). *Sustainable management after irrigation system transfer - Experiences in Colombia – The RUT Irrigation District*. Wageningen University.
- Vargas, L. (2015). *Prototipo para la recolección y reutilización de aguas residuales en la sede del claustro de la Universidad Católica de Colombia*. Universidad Católica de Colombia.
- Vélez Londoño, E. (2013). *EFICIENCIA EN LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO EN ANTIOQUIA : SECTOR PÚBLICO Y PRIVADO*.
- Williams, C. M. (2011a). *Desechos del Matadero. Revisión Del Desorrollo Avícola*, 83(1), 59–60.

- [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00199-7](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00199-7).Las
- Williams, C. M. . (2011b). Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo. *Revisión Del Desarrollo Avícola*, 1–2pp. <https://doi.org/978-92-5-308067-0> (PDF)
- Winpenny, J., Heinz, I., & Koo-Odhima, S. (2013). Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficio para todos? *FAO*, 35, 144.
- WWAP. (2006). *Water: A Shared Responsibility. Water Resources*. <https://doi.org/10.7748/nm.21.4.12.s12>
- WWAP. (2016). *Agua y Empleo. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016*. Paris.
- WWAP United Nations World Water Assessment Programme. (2016). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas.
- Yepis Vargas, O., Fundora Herrera, O., Pereira Marin, C., & Crespo Borges, B. (1999). Contaminacion Ambiental Por El Uso Execivo De Fertilizantes Nitrogenado En El Cultivo Del Tomate. *Contaminacion Ambiental Por El Uso Execivo De Fertilizantes Nitrogenado En El Cultivo Del Tomate*, 12(24), 5–12.
- Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P. H., Zarate, E., & Hoekstra, A. Y. (2012). Assessing water footprint at river basin level: A case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2771–2781.