

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA DE GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN
ZONAS ABASTECIDAS POR ACUÍFEROS**



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A

JOSÉ WILSON IBÁÑEZ GIL

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN HIDROAMBIENTAL

TUNJA

2021

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA DE GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN
ZONAS ABASTECIDAS POR ACUÍFEROS**

JOSÉ WILSON IBÁÑEZ GIL

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería Civil con énfasis Hidroambiental

Director:

M.Sc WILSON ENRIQUE AMAYA TEQUIA

Universidad Santo Tomás - Seccional Tunja

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN HIDROAMBIENTAL

TUNJA

2021

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 05 de octubre de 2021

Dedicatoria

A Dios como ser superior que orienta cada uno de los pasos que damos, a mi padre Siervo Ibáñez Sánchez que con sus grandes esfuerzos me dio la oportunidad y apoyo necesario para cumplir mis metas profesionales, hoy, aunque no estas entre nosotros sé que te habría gustado acompañarme a mi graduación.

Agradecimientos

A Claudia por el apoyo y paciencia en todo este tiempo de aprendizaje y capacitación que limitaron algunos de nuestros proyectos y compartir como pareja. A mis padres que siempre tuvieron el soporte para emprender cada proyecto y trabajo.

A los ingenieros Camilo Lesmes y Wilson Amaya por creer en el proyecto, a cada uno de los docentes y amigos que aportaron las ideas, logros y tropiezos para llegar a feliz término, en especial a Ferney, Jhony, Tatiana y Alex, entre otros.

Un saludo especial a la compañera que por cosas laborales dio origen a esta idea, en pro de conocer una alternativa para el abastecimiento de agua potable especialmente en espacios geográficos donde existe disponibilidad de aguas subterráneas.

Tabla de contenido

Introducción	11
1 Objetivos.....	15
2 Antecedentes	16
3 Justificación.....	21
4 Estado del Arte.....	27
4.1 Recurso Hídrico	27
4.2 Ciclo Hidrológico y Alteraciones	28
4.3 Cambio Climático y Ciudad	31
4.4 Acuíferos y Aguas Subterráneas	33
4.4.1 Importancia del Agua Subterránea.....	38
4.4.2 Desplazamiento del Agua en el Acuífero.....	38
4.4.3 Tipos de Acuíferos en Función del Nivel Piezométrico	38
4.4.4 Balance Hídrico del Suelo	39
4.4.5 Intrusión Marina	40
4.4.6 Impermeabilización del Suelo.	41
4.4.7 Capacidad de Recarga.....	41
4.5 Plan de Desarrollo Sostenible y Gestión del Agua	41
4.5.1 Definición y Adquisición de Áreas de Importancia Estratégica de los Acuíferos.....	44
4.5.2 Implementar de Soluciones de Conservación y Cuidado de Acuíferos a Nivel Mundial.....	44
4.5.3 Alternativas de Recarga Gestionada de Acuíferos.....	45
4.5.4 Recarga de Acuíferos de Forma Natural y Protegida.....	47
4.5.5 Alternativas de desalinización.....	48

4.5.6	<i>Componente de Actores Gubernamentales</i>	48
4.5.7	<i>Políticas de Conservación de Zonas de Recarga.....</i>	49
4.5.8	<i>Riesgos de Impacto Colateral Coronavirus 2019 en el Agua Potable</i>	49
4.5.9	<i>Situación Particular de San Andrés</i>	51
4.5.10	<i>Situación Particular Tunja</i>	51
4.5.11	<i>Enseñanzas y Propuestas a Aplicar en los Entornos de San Andrés y Tunja</i>	52
5	Casos de estudio.....	53
5.1	Acuífero de Tunja	53
5.1.1	<i>Representación del Acuífero en el Área</i>	54
5.1.2	<i>Características Geomorfológicas</i>	57
5.1.3	<i>Climatología (Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración).....</i>	59
5.1.4	<i>Población de la Zona de Estudio</i>	65
5.1.5	<i>Formas y Áreas de Recarga del Acuífero.....</i>	66
5.1.6	<i>Numero de Pozos y Caudal Extraído</i>	69
5.1.7	<i>Aportaciones Adicionales de Caudal para el Abastecimiento.....</i>	71
5.1.8	<i>Fuentes de Contaminación.....</i>	72
5.1.9	<i>Modelo de Elevación Digital.....</i>	72
5.1.10	<i>Problemática y Amenazas de Agua Subterránea en Zonas de Alta Montaña</i>	74
5.1.11	<i>Datos Ciclo Hidrológico Básico</i>	75
5.2	Acuífero de San Andrés.....	77
5.2.1	<i>Representación del Acuífero en el Área</i>	80
5.2.2	<i>Características Geomorfológicas</i>	81
5.2.3	<i>Climatología (Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración).....</i>	83
5.2.4	<i>Población de la Zona de Estudio</i>	84

5.2.5	<i>Zonas y Áreas de Recarga del Acuífero</i>	85
5.2.6	<i>Recarga Gestionada o Artificial en la Isla de San Andrés.....</i>	86
5.2.7	<i>Numero de Pozos y Caudal Extraído</i>	86
5.2.8	<i>Aportes Adicionales de Caudal para el Abastecimiento.....</i>	89
5.2.9	<i>Fuentes de Contaminación.....</i>	89
5.2.10	<i>Modelo de Elevación Digital SAI.....</i>	89
5.2.11	<i>Problemática y Amenazas de Agua Subterránea en la Isla.....</i>	91
5.2.12	<i>Datos Ciclo Hidrológico Básico</i>	96
6	Sistemas de Explotación del Recurso Hídrico	98
6.1	<i>Relación Población vs Disponibilidad de Agua de los Acuíferos a 2040 y 2100.....</i>	98
6.1.1	<i>Métodos de Proyección de Población</i>	98
6.1.2	<i>Población Proyectada para Tunja 2020 a 2100.</i>	100
6.1.3	<i>Población Proyectada para Isla de San Andrés a 2020-2100.....</i>	101
6.1.4	<i>Proyecciones de Precipitación y Temperatura Sistema Acuífero Tunja</i>	103
6.1.5	<i>Proyecciones San Andrés Precipitación y Temperatura</i>	108
7	Desarrollo y Consolidación de los Productos de Investigación (Resultados)	109
7.1	<i>Metodología de Gestión del Recurso Hídrico en Acuíferos</i>	109
7.1.1	<i>Descripción de Metodología</i>	109
7.1.2	<i>Componente A. Ingreso, Procesamiento y Análisis en Software Mathcad Prime</i>	115
7.1.3	<i>Componente B. Ingreso, Procesamiento y Análisis de Información en Software Stan</i>	117
7.2	<i>Productos Generados con la Metodología Establecida</i>	119
7.2.1	<i>Acuífero Sector Tunja 2021- I. Estado Actual.....</i>	119
7.2.2	<i>Acuífero Sector Tunja 2021- II. Únicamente Aportes Externos</i>	126
7.2.3	<i>Acuífero Sector Tunja 2021- III. Situación Crítica</i>	128

7.2.4	<i>Análisis Acuífero San Andrés- I. Situación Actual</i>	129
7.2.5	<i>Análisis Acuífero San Andrés- II. Situación Crítica</i>	131
7.2.6	<i>Proyecciones de comportamiento 2040 -2100</i>	133
Conclusiones		140
Recomendaciones		143
Referencias		145
Anexos		155
Anexo 1. Planos.....		156
Anexo 2. Acuífero Sector Tunja 2021- I. Estado Actual		174
Anexo 3. Acuífero Sector Tunja 2021- II. Únicamente Aportes Externos		203
Anexo 4. Acuífero Sector Tunja 2021- III. Situación Crítica.....		232
Anexo 5. Análisis Acuífero San Andrés- I. Situación Actual.....		261
Anexo 6. Análisis Acuífero San Andrés- II. Situación Crítica.....		290
Anexo 7. Proyección Sistema Acuífero de Tunja 2040-2100		319
Anexo 8. Proyección Sistema Acuífero San Andrés 2040-2100		404

Lista de Siglas y Abreviaciones

ArcGIS: es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG) (“¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center”, s/f).

CORALINA: Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

CORPOBOYACÁ Corporación Autónoma Regional de Boyacá

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

MAR: Recarga Gestionada los Acuíferos, por sus siglas en inglés (Managed Aquifer Recharge) consiste en el ingreso artificial de agua al acuífero

MFA: Metodología de análisis de flujo.

Microsoft Office: es un paquete de programas informáticos para oficina desarrollado por Microsoft Corp. (una empresa estadounidense fundada en 1975). Se trata de un conjunto de aplicaciones que realizan tareas ofimáticas (Excel, Word, etc.) <https://definicion.de/microsoft-office/>

OCCRE: Oficina de Control, Circulación y Residencia.

OMS - Organización Mundial de la Salud.

SAI: San Andrés Isla.

STAN: (abreviatura de Substance Flow Analysis) es un software gratuito que permite realizar análisis de flujo de materiales (MFA). La idea principal detrás de STAN es la combinación de todas las características necesarias de un MFA en un producto de software: modelado gráfico, gestión de datos, cálculos y presentación gráfica de los resultados (Cencic & Rechberger, 2008, p. 440).

ZCIT: Zona de Convergencia Inter Tropical.

Resumen

“Las aguas subterráneas es la fuente más abundantes de agua dulce en tierra y crucial para la vida” (Velis, Conti, & Biermann, 2017, p. 1), es un elemento esencial en el ciclo hidrológico y valioso recurso natural que se constituye como fundamental proveedor del líquido para la agricultura, uso doméstico e industrial. Se estima que cerca de la mitad fluido potable en el mundo y un 43% del consumido para irrigación se extrae de los acuíferos (UNESCO, 2015a, p. 4).

Su uso depende del acceso, cantidad y calidad con que se cuente, variables indispensables para el desarrollo de cualquier especie, sin embargo, su contaminación se da por acciones naturales, por intervenciones directas o indirectas del hombre sobre los ecosistemas, que ocasionan infiltración de sustancias perjudiciales en el suelo. De igual forma, el cambio climático está afectando la recarga, mientras que el crecimiento de la población, las técnicas mejoradas de perforación y progreso conducen a una mayor demanda de los recursos (Robert G et al., 2017, pp. 1–2).

Las últimas investigaciones de expertos sobre el cambio climático, destacó que la simulación de tendencias y variabilidad en el ciclo del agua sigue siendo un desafío mundial (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2017), por ello nuestras ciudades no son ajenas a tal situación, especialmente en capitales como Tunja y San Andrés, donde existe limitante de aguas superficiales y utilizan el agua subterránea para abastecer la población.

Teniendo en cuenta lo anterior este proyecto de investigación busca concebir una metodología insumo (modelo), para la toma de decisiones que permitan definir soluciones acertadas, de consenso con las comunidades, que contribuyan a la gestión sostenible del agua como apuesta para el futuro, salvaguardando la vida de los individuos, entorno y sin menoscabo del medio ambiente.

Palabra Clave

Acuíferos, sostenibilidad, recurso hídrico, recarga, cambio climático, gestión del agua.

Introducción

El agua es un elemento fundamental para el sostenimiento y la vida en el planeta. Es un bien de primera necesidad para los seres vivos (Pérez Campomanes, 2016, p. 8). Es el líquido vital de uso común, toda vez que no excluye, pero después de utilizado un metro cubico nadie más posee ese derecho, por lo tanto se vuelve excluyente, lo que termina con la sobreutilización del recurso, que trae consigo la sobreexplotación o agotamiento.

El acceso al agua y al saneamiento es un derecho humano, foco de políticas y objetivos de desarrollo internacional a través del tiempo. Se prevé que en 2030 la humanidad tendrá que enfrentarse a un déficit mundial del 40%. Sin embargo, hay recurso hídrico suficiente como para satisfacer las necesidades crecientes del mundo, cambiando radicalmente el modo de uso, manejo y participación (UNESCO, 2015b, p. 1).

El derecho al agua adecuada y asequible y el saneamiento está implícito y reconocido en varios pactos, convenciones y declaraciones (UN-Habitat, 2016, p. 6) de orden mundial. El ciclo hidrológico garantiza que no se pierda y el agua vuelva a ser utilizada, por ello se considerada renovable controlando su uso, tratamiento, liberación y circulación, pero la disponibilidad de recurso no contaminado disminuye constantemente (Pérez Campomanes, 2016, p. 9).

Dicha disponibilidad natural de agua dulce está dada por la cuantificación hídrica asociada con los procesos del ciclo hidrológico, con su dinámica, distribución espacial y temporal en el territorio. Determinada por la ubicación geográfica, características fisiográficas y la variedad de los escenarios climáticos, viéndose afectada por presiones por uso y contaminación de los sistemas hídricos (IDEAM, 2018, p. 10).

El suministro de agua en las ciudades y los asentamientos humanos es un tema de importancia mundial y de permanente análisis, donde Colombia tiene un rol fundamental (Marín Ramírez & Gutiérrez Palacio, 2018, p. 11), para garantizar el cumplimiento de actividades y metas orientadas a la

protección del recurso. Y como lo expresa Karimov, Smakhtin, Gracheva, & Miryusupov referente al crecimiento de la población y el cambio climático aumentan la brecha entre recursos hídricos disponibles y demanda de agua para alimentos, energía, otras necesidades humanas y ecosistemas (2014, p. 1).

Por ello se avecina una crisis, la cual tendrá efectos nocivos sobre la vida humana y una problemática en la gestión (Vaqharfard & Dashtpajardi, 2014, p. 1316). Así las cosas, uno de los principales retos para la humanidad, es enfrentar los efectos de los cambios acelerados del clima, los cuales tienen impacto en el ambiente, la sociedad y la economía. La ciencia prevé que el mundo puede llegar a tener dos grados más de temperatura para 2100. Escenario en el cual todos estemos actuando en la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) y en la adaptación de las consecuencias del cambio climático (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015, p. 4).

Los efectos climáticos adversos y cambiantes, aunado al aumento de población y con ello la necesidad de abastecer grandes urbes, garantizando la disponibilidad del agua para consumo humano, la agricultura e industria, hacen que el hombre busque obtener y conocer otras alternativas como el abasto de aguas subterráneas.

Porque dichos cambios incluyen aumento en la intensidad de las precipitaciones sin un aumento claro en la precipitación media, junto con la urbanización e impermeabilidad del suelo se espera un impacto negativo a largo plazo en la recarga de agua subterránea. El nivel del mar también está mostrando un incremento constante durante las últimas dos décadas que puede aumentar la erosión costera y conducir a inundaciones estacionales de áreas bajas, lo que finalmente reducirá la disponibilidad (Comte et al., 2016, p. 19).

Y con ello, más de 1.500 millones de personas dependen de los recursos hídricos subterráneos en todo el mundo, son realidades que muchos enfrentarán a medida que aumente la población mundial y las alteraciones estresan los suministros actuales. En escenarios adversos de gestión del agua, integrar

conceptos de uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales serán esenciales para respaldar la demanda futura (Gibson, Campana, & Nazy, 2018, pp. 1–2).

Dado que el recurso hídrico superficial está siendo severamente contaminado y disminuido, las comunidades proyectan y ejecutan la explotación del agua subterránea. Los manejos inapropiados pueden tener efectos irreversibles, a tal punto de causar el deterioro total.

En los términos como lo señala Bedoya & Carmona (2010, p. 2) surge la necesidad que los actores involucrados, implementen metodologías y estrategias para el manejo de los acuíferos que sean de una manera coherente con el ambiente físico y socioeconómico.

En el mismo sentido lo considera los autores S. Hamdan y T. J. Qureshi, A.S., Ahmed, Z.U., quienes plantean que los recursos hídricos convencionales no son suficientes para satisfacer la creciente demanda, situación que condujo al deterioro de la calidad y cantidad en los acuíferos, por ello los métodos de extracción y tratamiento son primordiales para la sostenibilidad. En consecuencia, se buscan estrategias poco usadas como desalación, reutilización de aguas residuales tratadas y captación pluvial (Hamdan, 2012, p. 83).

Debe existir una reserva de agua para el medioambiente después de todos los usos concesionados y no concesionado, por lo tanto, es vital evaluar los sistemas para toma de decisiones que permitan garantizar dichos preceptos de sobrevivencia, por ello se requiere programas de desarrollo para respaldar la alta tasa de aumento de población en las regiones, incluido un fuerte progreso urbano.

Aumentar el almacenamiento mediante una combinación de agua subterránea y grandes y pequeñas instalaciones de superficial es fundamental para atender los problemas de recurso hídrico en el siglo XXI (Karimov et al., 2014).

En cuanto al modelamiento de escenarios, la atribución está limitada por la capacidad de los modelos para simular cambios del sistema climático (sequía, actividad de ciclones tropicales, hielo

marino antártico, temperatura y balance de masa), debido a incertidumbres en las observaciones, en el modelado y resultados divergentes (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2017).

Por lo anterior, existe la necesidad de evaluar la sostenibilidad del recurso hídrico, de forma sencilla, rápida, simple y amigable con el gestor (usuario de la metodología), que ayude a conocer la situación actual del proyecto, crear situaciones futuras e hipotéticas, como mecanismo de apoyo para la toma de decisiones.

Para el caso específico, se propone una metodología de evaluación de entornos ubicados en zonas abastecidas de forma parcial y/o total por aguas subterráneas, basada en información climática, población, entorno, experiencia de los profesionales (panel de expertos), entes gubernamentales y comunidades intervinientes.

Caracterizado el sistema con las diferentes fuentes de información, se aplica la metodología basada en el balance de masas generando un modelo matemático, diagramas de flujo, cuantificación, gráficas y magnitudes, así como un bosquejo rápido de la situación existente, permitiendo la creación de nuevas hipótesis para análisis de los gestores y con ello obtener la evaluación de la sostenibilidad del recurso hídrico.

La metodología propuesta es aplicada en dos casos de estudio: sistema de acuíferos de Tunja y el de la Isla de San Andrés, en 11 situaciones distintas mediante el software Mathcad y Stan.

El lector en el presente trabajo encuentra aspectos importantes del recurso hídrico, impactos del cambio climático, datos detallados de las dos zonas de estudio relacionadas con acuíferos, sistema de recarga, planteamiento y resultados de la metodología para los casos de análisis.

1 Objetivos

Objetivo general

- Evaluar el manejo del recurso hídrico en zonas que se abastecen de acuíferos para consumo humano mediante metodología propuesta. Caso de estudio isla de San Andrés y de Tunja.

Objetivos específicos

- Caracterizar el sistema de explotación de los acuíferos en San Andrés y de Tunja, teniendo en cuenta procesos de recarga, extracción, disponibilidad, información climática, población y actores involucrados, para identificar los factores de riesgo.
- Generar alternativas y/o propuestas para contrarrestar la posible problemática ambiental relacionada con la escasez del agua potable en zonas de estudio acuíferos en San Andrés y de Tunja.
- Evaluar la sostenibilidad en el manejo del recurso hídrico de los acuíferos de San Andrés y de Tunja.

2 Antecedentes

El recurso hídrico es primordial para el desarrollo de los seres vivos en el planeta, donde gran porcentaje de la superficie terrestre está cubierta por agua, mares, océanos, ríos, glaciales, aguas subterráneas, hielo, nieve, nubes, entre otros.

Empleando las palabras de Marín Ramírez y Gutiérrez Palacio, llevar agua al mundo urbano pareciera hoy una tragedia incalculable, que implica intensas jornadas para debatir, consensuar y hasta concertar acceso a dicho recurso, dentro de refinados patrones de disponibilidad y sostenibilidad, en los que se puede apreciar una lucha general sin tregua entre la realidad, la utopía y la incertidumbre (2008).

El agua superficial es tangible y se han invertido importantes sumas de dinero en construir represas, diques, embalses artificiales, acueductos y canales de riego, todas obras visibles, por esto resulta natural pensar que esta manifestación constituye la mayor fuente para satisfacer las necesidades del mundo en materia hídrica (Peralta & López, 2012, p. 73), pero la disponibilidad de los recursos hídricos depende de su accesibilidad, así como de su calidad, entendiendo que la contaminación puede deteriorar las aguas superficiales y subterráneas (Mas-Pla, Menció, & Folch, 2013, p. 582).

En general, se acepta que existe una demanda creciente y un criterio más estricto de calidad y cantidad de agua potable y no potable en los últimos años debido al estado actual de escasez mundial de agua, cambio climático y crecimiento de la población (Liu et al., 2021).

El agua potable ha sido el principal foco de atención desde principios de la década de 1990 cuando se evidenció contaminación de los acuíferos, situación relevantes por los impactos en la agricultura y poblaciones (Qureshi, A.S., Ahmed, Z.U., Krupnik, 2015, p. 25).

El cambio climático es uno de los grandes temas en la agenda del siglo XXI. Tal vez el principal canal de transmisión de los impactos sobre las actividades económicas y humanas es por medio de la disponibilidad de los recursos hídricos (CEPAL, 2015, p. 7). Este fenómeno producirá en muchas regiones un clima más seco. Por tanto, el acceso al agua potable en esos lugares será difícil con el paso del

tiempo. Con casos significativos donde ecosistemas han perdido las aguas que estaban en la superficie y se recurre a los acuíferos. Por lo anterior es necesario su estudio, así como establecer las reglas claras y justas para su uso (Sahuquillo, 2009, pp. 111–112). La falta del recurso puede producir muchos perjuicios, desde arruinar cosechas a provocar guerras.

Debido a la situación actual de escasez mundial de agua, encontrar estrategias que puedan garantizar eficazmente la seguridad y el uso sostenible del agua se ha convertido en un problema urgente que debe resolverse en la actualidad. El agua de lluvia es un tipo de energía limpia y el método de tratamiento y reutilización del agua de lluvia se ha convertido en un problema fundamental que vale la pena considerar (Liu et al., 2021).

El ser humano descubrió que la recolección de aguas lluvias realizada desde hace siglos, desarrollada como gestión y mejores prácticas de manejo de la precipitación con acumulación a pequeña escala de la proveniente de los techos y construcción en represas simples es una solución, anteriormente se captaba en caminos perfectos, donde los humanos hicieron las terrazas agrícolas de las colinas y el almacenamiento de agua detrás de diques artesanales (Hamdan, 2012, p. 42).

La escasez de agua en las ciudades se da por el crecimiento de la demanda causada por aumento de la población, mientras que la disponibilidad natural de los recursos se mantiene constante o decrece a causa de la contaminación y sobreexplotación de acuíferos. Aspecto no tenido en cuenta por en la concepción de algunas urbes que con el pasar del tiempo vieron limitado su acceso (Avila Garcia & Vivar Arenas, 2018, p. 5).

El agua subterránea representa la mayor reserva mundial de recurso potable para el futuro. Es estratégica en la lucha contra el cambio climático, la sequía o la contaminación de la superficial. Es invisible, lo que crea muchos problemas, toda vez que está contenida en la roca, pero que puede obtenerse y ser salubre (República de Panamá, 2013, pp. 2–121).

Pero, la reducción sustancial de los acuíferos debido a la sobreexplotación durante la última década ha sido ampliamente documentada (Qureshi, A.S., Ahmed, Z.U., Krupnik, 2015, p. 21).

Mostrando el poco aprendizaje de nuestros antepasados que se esforzaron mucho para recargar las aguas subterráneas, porque dependían de ellas para vivir (Yapa & Berkeley, 2013, p. 125). Con el alivio de encontrar disponibles diferentes técnicas de recarga artificial que podrían proporcionar una opción de gestión para superar estas situaciones (Sultana, Ahmed, & Mia, 2010, p. 2).

Desde el punto de vista hidrogeológico la calidad del agua subterránea es tan primordial como la cantidad explotable. La disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos para determinados tipos de uso depende fundamentalmente de las características físico químicas, biológicas y radiológicas (Collazo Caraballo & Montaña Xavier, 2012, p. 30).

A pesar de los efectos ambientales negativos presentados a través de los años, no se han implementado medidas óptimas para restablecer las condiciones naturales originales como tampoco para preservar ecosistemas afectados. Una buena parte del deterioro pudiera aliviarse de lograr entender el papel del agua subterránea en el ambiente (Arévalo & Joel Carrillo Rivera, 2012, p. 19).

El uso intenso de los acuíferos además de producir descensos en el nivel piezométrico disminuye los caudales de ríos, manantiales y zonas húmedas e incluso originan que un río pase de ser ganador a perdedor, si los bombeos son suficientemente grandes y continuados, por otra parte, en muchas ciudades en las que se ha disminuido la explotación de aguas subterráneas por contaminación u otras causas produce aumentos importantes de los niveles ocasionando problemas de inundación de sótanos, garajes o túneles urbanos (Sahuquillo, 2009, pp. 102–104).

La exploración de acuíferos y la evaluación del suministro de agua es un desafío clave en los países de ingresos bajos y medios, donde la caracterización de posibles fuentes subterráneas es necesaria, con el atenuante que en las últimas décadas se ha producido un aumento considerable de uso (Hernández-Espriú et al., 2017, p. 1).

La relación entre aguas superficiales y subterráneas y el tener particularidades complementarias para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos permite que sea interesante su unión a través de la recarga artificial o del denominado uso conjunto alternante.

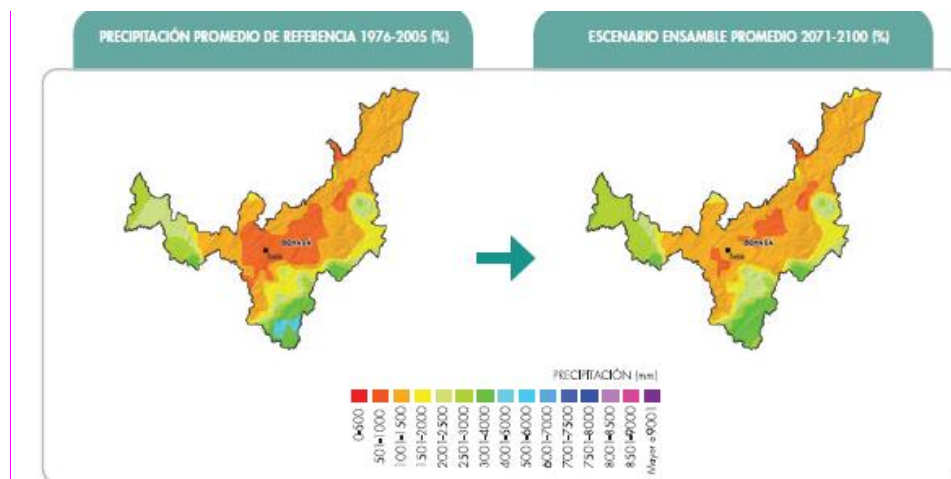
La explotación de aguas subterráneas por tratarse de un tema relativamente nuevo en el país, e invisible, encuentra en algunas zonas oposición por parte de las comunidades a la construcción de pozos profundos, que en varios casos no obedecen a una planeación de un proyecto integral.

Por lo anterior, la escasez de datos relevantes y de buena calidad afecta el rendimiento de los modelos socioeconómicos, hidrológicos y climáticos y, por lo tanto, limitan su utilidad y credibilidad como apoyo en la toma de decisiones y formulación de políticas (UNESCO, 2015b, p. 8).

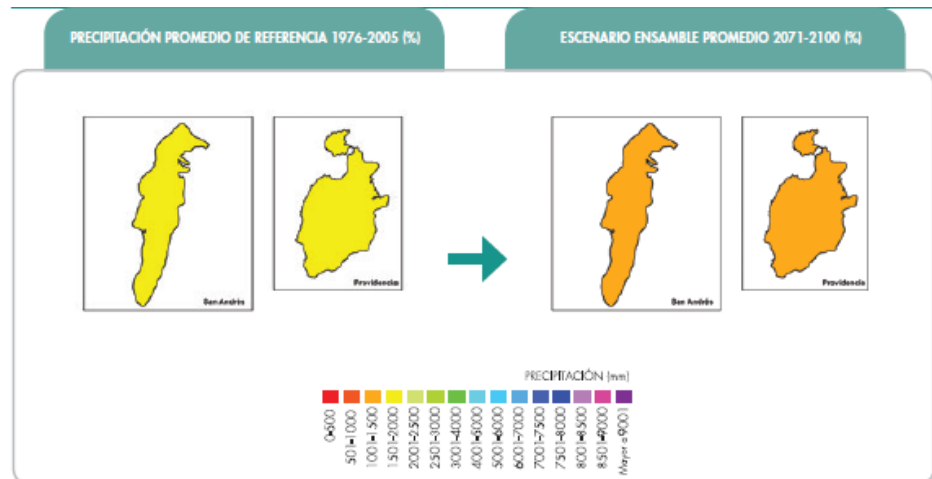
Atendiendo que la gestión del líquido vital es multidimensional y puede ser abordada desde diversas perspectivas y enfoques, acorde al ciclo integral del agua (captación, producción, distribución, consumo, recolección, tratamiento y restitución al medio); según el ámbito de la misión geográfica (si es urbana o rural); de acuerdo al enfoque de oferta o demanda; el de conservación o de derechos humanos priorizando los aspectos de gobernanza, entre muchos otros (Inmet, Bobadilla Díaz, Romero Neira, & Ministerio de Vivienda, 2016).

Y que las aguas subterráneas son un componente vital de los recursos hídricos del planeta (Kovacs, Mancini, & West, 2015) siendo su evaluación en diferentes cuencas hidrológicas, uno tema principales ambiental de la actualidad para la gestión y aprovechamiento de los mismos (Sáenz Galvis Kristy Dayana, 2014, p. 43), se propone dos casos de estudio ubicados en **TUNJA y SAN ANDRÉS**.

Porque, la zona centro del departamento de Boyacá para el siglo XXI presentará un aumento progresivo en la precipitación del 20% y 40% mostrada en la Figura 1 y se espera que en zonas como San Andrés disminuya entre 10 a 30% como se aprecia en la Figura 2 (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, et al., 2015), consideración transcendental por ser una fuente de uso y recarga de acuíferos que abastece a las comunidades.

Figura 1*Precipitación promedio Boyacá 1976-2005 2071-2100*

Nota. Tomado de (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015, p. 28) Precipitación.

Figura 2*Precipitación promedio San Andrés y Providencia 1976-2005 2071-2100*

Nota. Tomado de (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015, p. 48) Precipitación.

Así mismo, el crecimiento de la población mundial, concentración en los centros poblados y nuevos requerimientos de las poblaciones en materia de consumos hacen indispensable el cuidado y conservación del agua como recurso vital de la humanidad.

3 Justificación

Se espera que el cambio climático intensifique el ciclo hidrológico global acompañado de grandes permutaciones en la distribución y disponibilidad espacial y temporal de agua. Los cambios en precipitación, evaporación, transpiración, escorrentía y alimentación y flujo de las napas representan un claro peligro para los humedales afectando tanto a los sistemas de la superficie como a los del subsuelo (Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura, 2009, p. 49).

El clima será cambiante, con constantes variaciones en las precipitaciones. Las fuentes de agua superficial, como los ríos y los lagos, pueden sufrir mayor estrés hídrico. Por tanto, la demanda de puntos de extracción de aguas subterráneas aumentará. Esto ocurrirá, en regiones con rápido crecimiento de población y mayores exigencias de seguridad alimentaria (ANA, 2013).

Los problemas actuales en torno a la disponibilidad del agua en los Andes tropicales, sumados a las proyecciones de retroceso de los glaciares en el futuro, las posibles reducciones en las precipitaciones y el crecimiento demográfico continuo, requieren que rápidamente se formulen y apliquen estrategias de adaptación y mitigación, que podrían ayudar a aliviar, tanto a corto como a mediano plazo, los conflictos relativos al acceso a un recurso salubre (Vuille, 2013, p. 15).

Es un deber y un derecho que tenemos para cuidado y conservación de los recursos hídricos, por ser de primordial para la existencia humana y uno de los más preciados que brinda la naturaleza.

Ahora bien, el agua subterránea es un recurso natural, renovable, primordial para el desarrollo económico y social, pero vulnerable, por ello se debe implementar un sistema de evaluación y protección siendo una tarea difícil y compleja.

Existe un amplio consenso sobre el hecho de que los principales efectos del cambio climático que los seres humanos percibirán serán sus repercusiones en los recursos hídricos a escala mundial, incluidas las aguas subterráneas, los desastres relacionados con el agua, como las inundaciones y sequías (UNESCO, 2015a, p. 2).

A nivel mundial se propone promover una serie de medidas, alternativas y técnicas que busquen garantizar el cuidado de los acuíferos con el fin de obtener el volumen necesario de agua potable en todas las épocas del año, conservando la calidad y cantidad, siendo mecanismos sustentables y amigables con el medio ambiente.

Uno de los retos de una política pública eficiente en materia de recursos hídricos a nivel mundial, es lograr el abasto perenne del líquido a la población y que tenga asimismo la calidad exigida para consumo humano (Huizar Álvarez, Carrillo Rivera, & Juárez, 2016, p. 42).

Dada la relativa abundancia del recurso en América Latina y el Caribe, la primera prioridad para la región consiste en mejorar y consolidar la gobernanza del agua, con un cambio de paradigma hacia la integración sostenible de la gestión de los recursos hídricos y su uso en el desarrollo socioeconómico y la reducción de la pobreza (UNESCO, 2015b, p. 10).

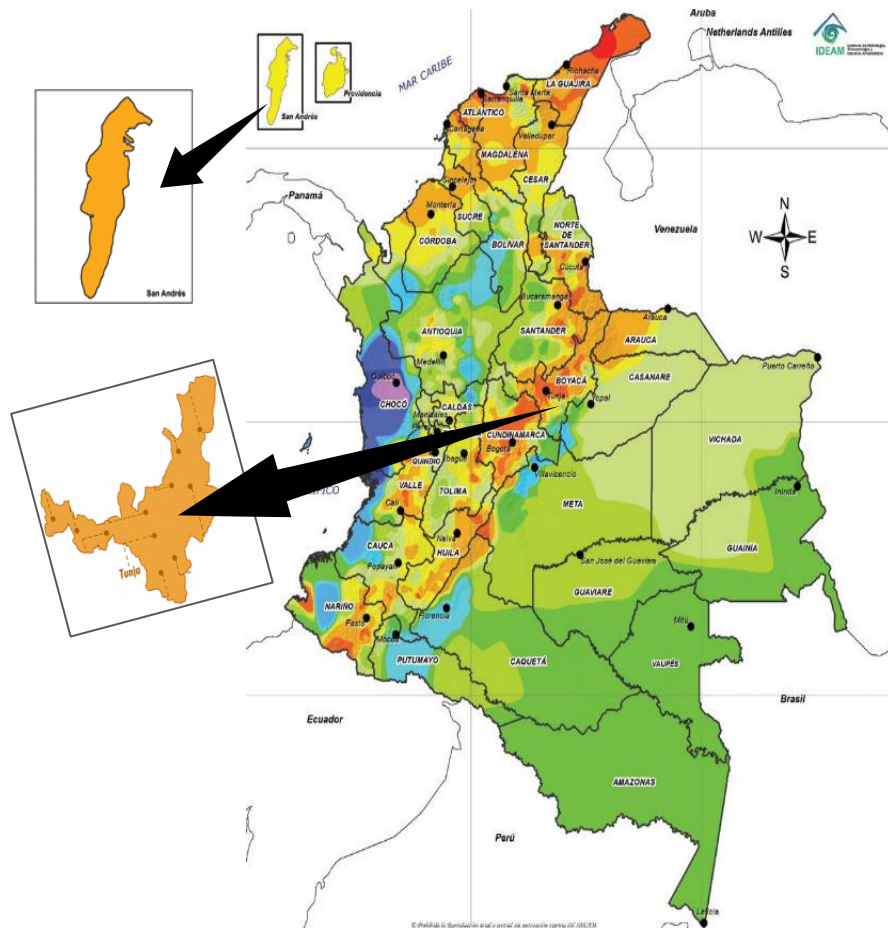
De lograr mejoras significativas en cuidado y recarga de acuíferos de una forma amigable con el medio ambiente, con características físico-químicas del agua adecuadas sin agredir los diferentes ecosistemas, con equilibrio en el tiempo, especialmente en épocas secas, impactará en una mejor calidad de vida, en la actividad económica y social, y como contribución en la conservación de los recursos naturales.

Por eso, para el presente estudio se seleccionaron dos casos, **el sistema de Acuíferos de Tunja y el de San Andrés**, atendiendo las siguientes características: son claros ejemplos de abastecimiento por medio de aguas subterráneas para el consumo humano; extremos según proyecciones de afectación de precipitaciones del IDEAM durante el siglo XXI; Tunja se abastece en menores proporciones de agua subterránea en cambio San Andrés es su fuente principal; tienen crecimiento atípico de las poblaciones por factores externos (estudiantes y turistas); poseen antecedentes de escases; impactos en el desarrollo económico y social, y finalmente la disponibilidad, acceso a la información y conocimiento

directo del autor. En la Figura 3 se muestra la ubicación geográfica en Colombia de las dos zonas de estudios abarcadas en este documento.

Figura 3

Casos de Estudio



Nota. Adaptado de (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, et al., 2015, p. 19,48), (“Miraflores Boyacá”, s/f).

Para el caso del acuífero de Tunja, la explotación promedio de agua subterránea es del orden de $1,550.000\text{m}^3$ /año (Monroy Vargas, González Galvis, & Peñaranda Vélez, 2010, p. 124). Asimismo la ciudad más representativa del área de estudio en población, centros administrativos, economía, extracción de aguas subterráneas es Tunja, “se ubica en cordillera Oriental, con alturas que van desde

los 2.700 hasta 3.150m.s.n.m en la parte más elevada, con una extensión de 121.4km² y una temperatura de 13°C” (Alcaldía de Tunja, 2015, p. 13). En la Figura 4 se muestra el centro histórico de la de la capital Boyacense como punto de referencia para identificar la primera zona.

Figura 4

Plaza principal municipio de Tunja departamento de Boyacá



Ahora bien, para la isla de San Andrés, tendrá efectos drásticos a causa del cambio climático, donde podrían evidenciarse en el servicio ecosistémico de provisión hídrica, debido a los aumentos acentuados de temperatura y disminución de precipitación. El sector turístico podrá verse afectado por la baja en la disponibilidad, el de salud por las crecientes en enfermedades asociadas a condiciones sanitarias y los cultivos de pancoger podrán presentar estrés térmico y deteriorando la oferta en las islas (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, et al., 2015, p. 48).

En la Figura 5 se muestra playas de la isla de San Andrés, aspecto turístico como punto de referencia para identificar la segunda zona de estudio.

Figura 5*Vista de playas isla de San Andrés*

Un aspecto a resaltar, tenemos que la disponibilidad de agua subterránea en la isla es menor que la estimada, pues es inevitable que una fracción de ella se pierda hacia el mar, debido a las condiciones geomorfológicas y por la cercanía al mar (Coralina, 2005, p. 29). Considerando la totalidad de la recarga como oferta neta y se extrae para consumo, esta sólo alcanzaría para abastecer al 50% de la población residente proyectada por el DANE para el 2013, y en este escenario el acuífero San Andrés experimentaría un estrés extremo y se contaminaría por intrusión marina (Minambiente & Coralina, 2013, p. 24).

Por lo antes expuesto, es crucial y necesaria una metodología sencilla, basada en conocimientos técnicos que permita estudiar la gestión del recurso hídrico en zonas que se abastecen de aguas subterráneas para consumo humano, y con ella se puedan identificar problemáticas, tomar acciones de mitigación y control de los efectos negativos en el medio ambiente y para esto el presente tomara como referencia al análisis de flujo de materiales (MFA).

Metodología que es una evaluación sistemática de los flujos y existencias de materiales dentro de un sistema definido en el espacio y el tiempo, basada en la Ley de la conservación de la materia, es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la gestión de recursos, residuos y ambiental, que permite reducir la complejidad procedimientos, garantizando una base de alternativas sensatas, con evaluaciones cuantitativas que disminuye incertidumbres (Brunner & Rechberger, 2016, p. 3). Su objetivo es describir y analizar una situación real lo más simple posible, pero con suficiente detalle para tomar determinaciones acordes (Cencic & Rechberger, 2008, p. 440).

Finalmente, no se evidencian registros en el país una metodología sencilla de evaluación de gestión del recurso hídrico que involucre como fuente primaria los acuíferos y su relación con el medio ambiente, su entorno, impactos socioeconómicos.

4 Estado del Arte

4.1 Recurso Hídrico

Pérez Campomanes plantea la existencia de partes del mundo en las que la demanda de agua excede el suministro. A medida que crece la población mundial, aumenta la cantidad necesaria y con ello una crisis del recurso afecta a millones de personas, sobre todo a los países más pobres, que sufren muchas enfermedades relacionadas con la calidad y el abastecimiento (2016, p. 10).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), define el agua potable como “adecuada para consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal. Por lo tanto, el uso de ella no debería presentar riesgo de enfermedades a los consumidores” (Ministerio de Salud, 2018, p. 8). Con ello se entiende que esta no debe poner en peligro a los seres humanos.

El servicio de agua potable es básico para el adecuado desarrollo de las comunidades, y su prestación depende de la coordinación, acciones permanentes y articulación de varias instituciones del ámbito estatal y privado (algunos casos), y su gestión impacta en salud de las personas.

Existen parámetros del agua para consumo humano como la calidad, cantidad, disponibilidad y el costo al usuario, por ende, es prioridad su conservación y cuidado en armonía con el medio ambiente, buscando utilizar únicamente lo necesario y devolver la utilizada en las mejores condiciones, por ello la importancia de los tratamientos previos y posteriores al uso.

Una adecuada gestión de manera macro, intensificando los esfuerzos en las fuentes de agua ya sea superficial o subterráneas, de tal forma que se pueda brindar un servicio de calidad a las poblaciones objetivo en costos razonables y conservando el medio ambiente, es vital para los seres vivos.

El agua impregna todos los aspectos de la vida. Al igual que el aire que respiramos, este recurso sostiene la existencia humana, animal y vegetal. Proporciona servicios vitales para la salud de las personas, los medios de subsistencia y el bienestar y contribuye a la sostenibilidad de los ecosistemas (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas [WWAP], 2016, p. 23).

El agua siendo un líquido vital debe ser cuidado ya sean las fuentes naturales o las subterráneas, por ende, debemos propender por tener una calidad y mejora en nuestro medio ambiente.

La gestión sostenible del agua, las infraestructuras y el acceso a un suministro seguro, fiable y asequible y servicios de saneamiento adecuados mejoran el nivel de vida, expanden las economías locales y promueven la creación de puestos de trabajo más dignos y a una mayor inclusión social, razón por la cual es también un motor esencial para el crecimiento verde y el desarrollo sostenible (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas [WWAP], 2016, p. 15).

4.2 Ciclo Hidrológico y Alteraciones

Podría decirse que el ciclo hidrológico es cerrado y continuo sin comienzo ni fin, es posible tomar como referencia la evaporación del agua en los océanos y superficies terrestres para involucrarse con el aire en forma de humedad atmosférica, allí el vapor por diferentes acciones se condensa y vuelve a la océano y masas continentales por la acción de la precipitación (lluvia).

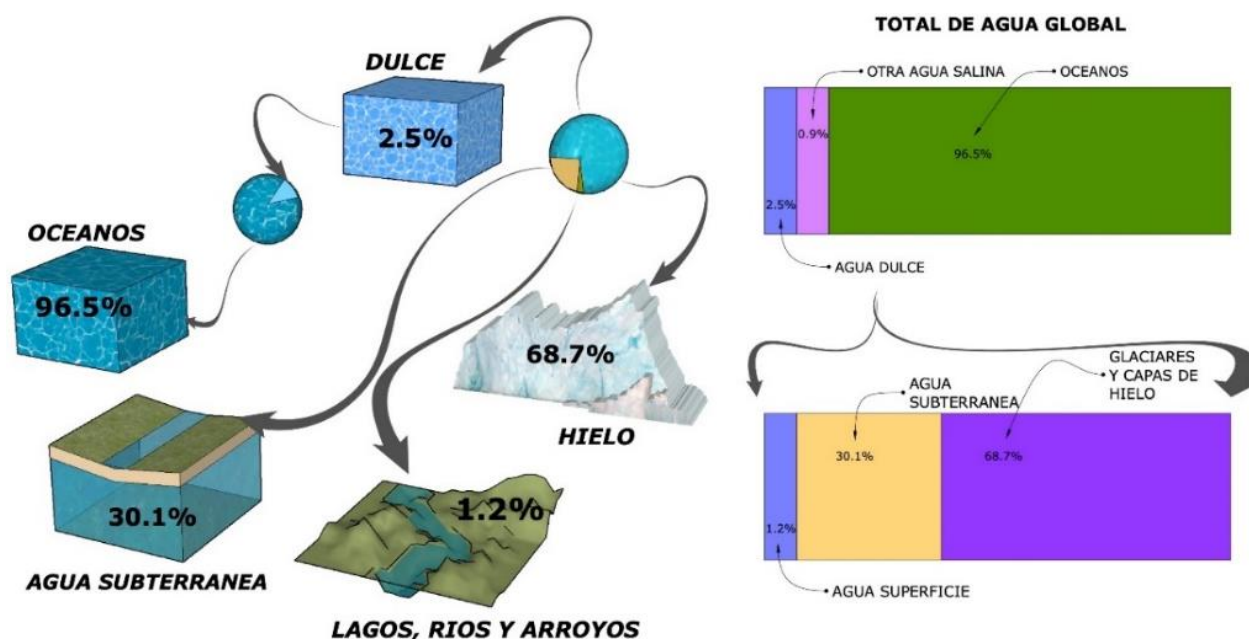
Los ríos y lagos constituyen menos del 3% del recurso dulce fluida de nuestro planeta. El 97% restante (unos 1230km³) se encuentran en el subsuelo (Peralta & López, 2012, p. 73), mostrado en esquema de proporción en la Figura 6.

En lo relacionado con la precipitación parte del volumen por la acción de la gravedad es recibida por la vegetación, otra se infiltra en el suelo recargando los acuíferos definida como agua subterránea, la escorrentía superficial relacionada con lo que escurre sobre la superficie terrestre, y a su vez esta fracción llega a cuerpos de agua y cauces que posteriormente descargan a los océanos. Cabe destacar que una buena porción de la precipitación se evapora y regresa a la atmosfera.

El ciclo hidrológico es el conjunto de cambios del agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (superficial, subterránea, entre otros), no es regular, una muestra de ello son los periodos de sequías y de inundaciones (Cahuana & Yugar, 2009, p. 38).

Figura 6

Porcentaje de agua subterránea en el mundo



Nota. Cantidad del agua subterránea y sus porcentajes en distribución global. Adaptado de ("Agua en el planeta – Agua.org.mx", s/f).

Este ciclo es posible sea alterado o modificado por eventos naturales y/o acción directa del hombre variando flujos y magnitudes de los procesos hidrológicos, caso puntual es el cambio en el uso del suelo con la construcción de ciudades, debido a la variación en la cobertura vegetal por toda la infraestructura, como son zonas residenciales, industriales, vías, equipamientos, entre otros aspectos.

Este impacto genera incremento de escorrentía superficial, disminución de infiltración por la presencia de obras civiles que generalmente son impermeables, originando baja en la recarga de acuíferos, problemas de inundación, cambios en el flujo base de cauces y a mayor detalle aumento de la temperatura, entre otros.

Con el conocimiento de la problemática en la actualidad a nivel mundial existe la posibilidad de utilizar diferentes estrategias, que buscan que los centros poblados impacten de menor forma el ciclo

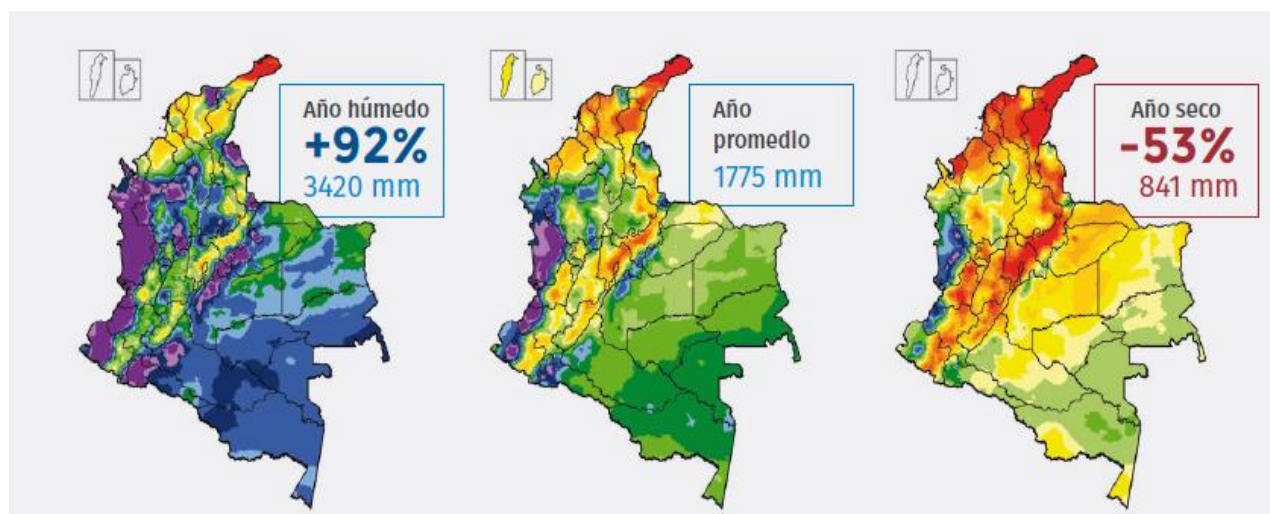
hidrológico con alternativas como pavimentos permeables, zonas de infiltración y acumulación temporal, aumento de áreas y techos verdes, dentro de los relevantes, lo cual está en desarrollo y su implementación en el país es mínimo comparado con el crecimiento de las ciudades.

En los dos casos de estudios existe una alta inversión en obras de infraestructura y edificaciones, acentuándose la situación en la ciudad de Tunja, la cual afronta un periodo de auge en la urbanización con altas tasas, dadas principalmente por la cercanía al mayor centro poblado (Bogotá) que tiene Colombia y para San Andrés por la presencia de turistas tienen la necesidad de utilizar las precipitaciones para recargar los acuíferos existentes en cada zona.

En la Figura 7 se muestra tres escenarios de humedad por año para Colombia, indicando los promedios de precipitación que se presentan en el territorio.

Figura 7

Precipitaciones para año húmedo, uno promedio y uno seco en Colombia.



Nota. La imagen muestra la diversidad de agua que existe en un año húmedo, promedio y seco. Tomado de (IDEAM, 2018).

4.3 Cambio Climático y Ciudad

El clima de nuestro planeta está cambiando, en el pasado siempre ha sido variable, pero hoy en día se percibe una preocupación creciente acerca de los problemas del cambio climático, tal vez por la magnitud de los cambios parece no tener precedentes, principalmente porque existen claras evidencias que sugieren que la humanidad podría ser directamente responsable (Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura, 2009, p. 13).

Los cambios permanentes que podría sufrir el clima de las diferentes regiones del mundo, exigirán trascendentales acciones de adaptación para la reducción de riesgos naturales, mantener la capacidad de producir alimentos, evitar la degradación de los ambientes, las extinciones de importantes especies, el agotamiento del agua dulce, la esterilización de los suelos y un potencial desequilibrio biológico que afectaría a los ecosistemas biológicos, agrícola y a la salud humana (CEPAL, 2015, p. 8).

Los riesgos que enfrentan las ciudades en la actualidad son resultado del cambio climático y los desastres naturales, las urgentes de carencia del líquido vital, saneamiento y servicios de gestión de residuos y el deterioro de la calidad de aire y agua, se están experimentando con un crecimiento acelerado (UN-Habitat, 2016, p. 56). Situación que permite la ocurrencia de fenómenos como sequías, inundaciones a nivel global, que impactan en las regiones y seres vivos.

Los principales problemas e impactos fruto del cambio climático estudiados son el aumento de la evaporación y evapotranspiración en las nuevas condiciones ambientales, una mayor demanda de agua, incremento del riesgo de incendio, reducción de la oferta hídrica y garantía de suministro en determinados lugares, extremismo en la escorrentía, afecciones a los humedales y menor producción de energía hidroeléctrica, con un efecto directo en el precio de la electricidad (Fernandez-Escalante, San Sebastian Sauto, Villanueva Lago, & Calero Gil, 2018, p. 2).

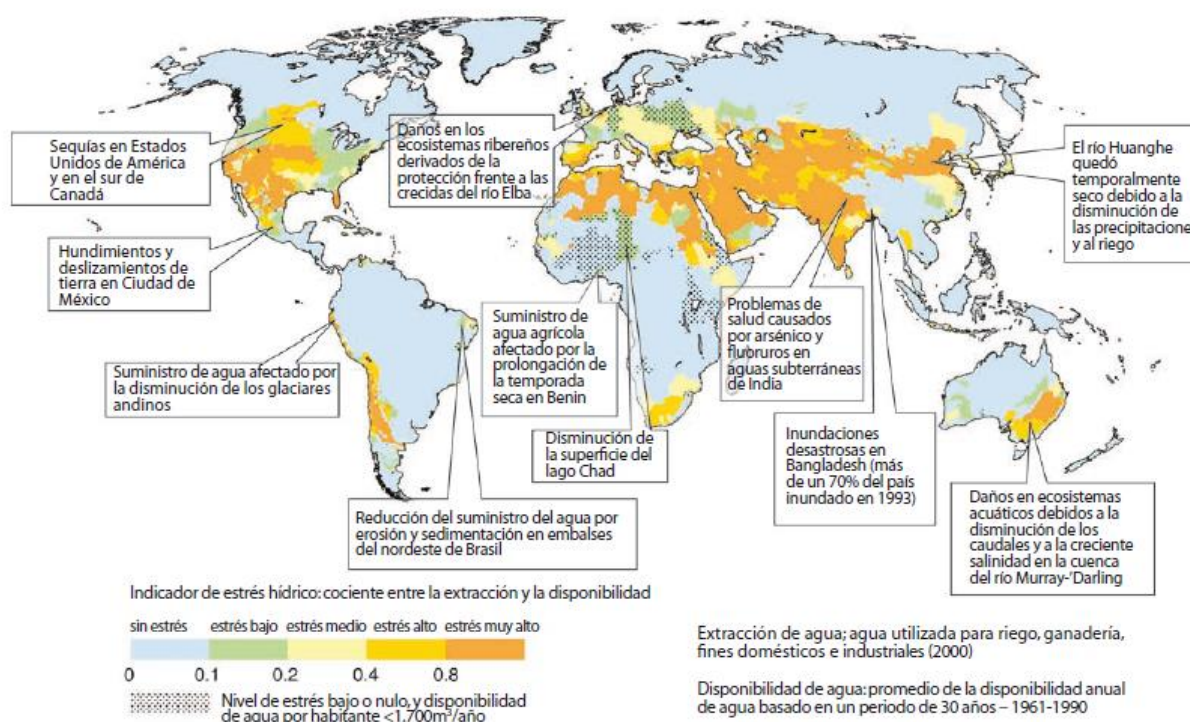
El ciclo global del agua continuará intensificándose a medida que las temperaturas globales aumentan y se prevé que las precipitaciones y los flujos de agua superficial tenga variables de una año al

otro, previendo cambios en la precipitación terrestre media anual a nivel mundial (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021b).

Por el cambio climático se prevén riesgos en la afectación de fuentes de agua y los fenómenos extremos como se puede apreciar en la Figura 8, trayendo consigo que las zonas áridas serán más críticas y las húmedas tendrán mayor precipitación, por ello habrá grandes sequías e inundaciones.

Figura 8

Efectos del Cambio Climático en el Recurso Hídrico



Nota. Tomado de: Ejemplos de vulnerabilidad actual de los recursos de agua dulce y de su gestión; al fondo, un mapa de estrés hídrico (Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, 2008).

La contaminación hídrica, no solo de las aguas frescas sino también de los océanos, es otro de los grandes impactos que generan los centros urbanos, tanto por los vertimientos industriales como por los domésticos. Según el “Global Environmental Outlook”, divulgado por el Programa de Naciones

Unidas para el Medio Ambiente en 2007, concluyó que la actividad del ser humano ha puesto una gran presión sobre este, lo que ha causado un cambio climático que altera e intensifica el uso del líquido vital, destruye y contamina los medios acuáticos y sobreexplota los recursos pesqueros.

El ciclo del agua a nivel global se ha visto severamente afectado por las actividades humanas; así lo evidencia el deterioro de los ecosistemas asociados a los recursos hídricos y el estado de sus condiciones físicas, lo cual tiene un severo impacto sobre la salud humana. (Maldonado, 2009, p. 68).

Corroborado por la Organización Mundial de la Salud OMS en el 2018, quienes establecieron la existencia de efectos sobre la salud humana que puede ocasionar enfermedades intestinales graves, incluida la disentería bacilar. Cada año se producen más de dos millones de infecciones que ocasionan unas 600.000 muertes, agudizado en países en desarrollo que la mayoría de contagios impactan a niños menores de 10 años (Organización Mundial de la Salud, 2018).

Los acuíferos se encuentran en crisis debido a su extracción excesiva en muchas regiones semiáridas y áridas, así como las consecuencias aún inciertas del cambio climático, que prevé la modificación considerablemente el ciclo hidrológico mundial (UNESCO, 2015a, p. 2).

Por ende, es deber cuidar los recursos hídricos subterráneos ya que para el futuro serán las fuentes de disponibilidad. Conforme a lo expuesto gestionar la sostenibilidad de los acuíferos para preservarlos y garantizar la disposición a posteridad es trabajo de todos.

4.4 Acuíferos y Aguas Subterráneas

Un acuífero es un depósito de agua subterránea, se da por acción de la precipitación absorbida por el suelo que rellena las cavidades en la arena, arcilla, grava o piedras del subsuelo. La gravedad provoca el descenso de la masa de líquido hasta que se encuentra con una capa impermeable (Peralta & López, 2012, p. 74). En el mismo sentido, se define como formaciones geológicas para la circulación y alojamiento del recurso, sensibles a cualquier intervención, por consiguiente es indispensable un

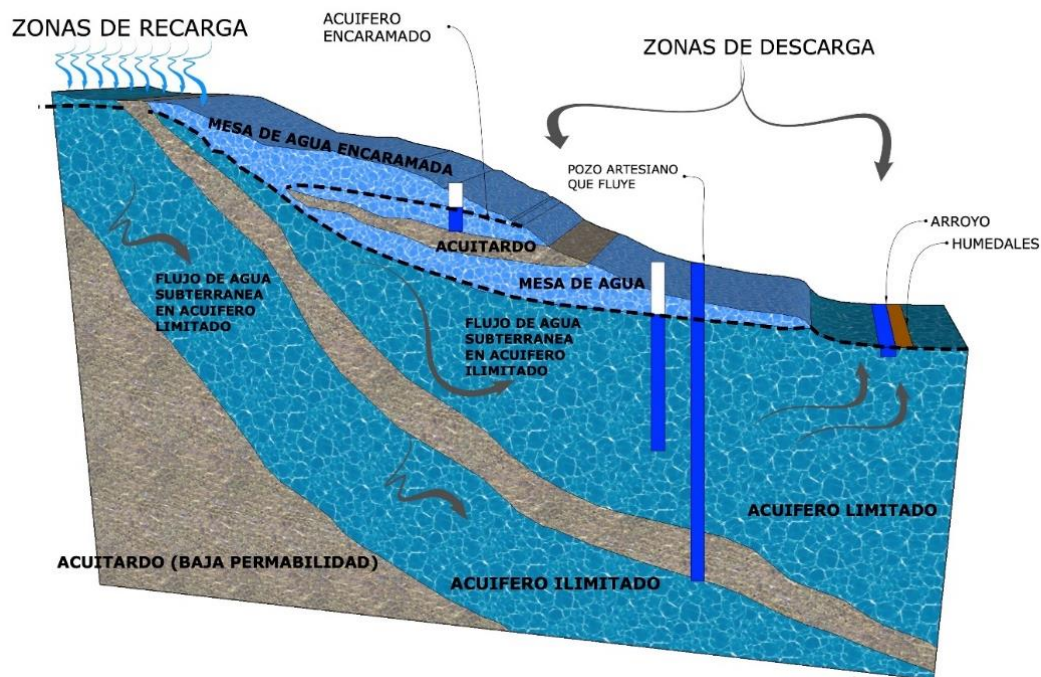
manejo sostenible, explotación racional, recarga y renovación, sin perjudicar la riqueza natural que este bien representa (Collazo Caraballo & Montaña Xavier, 2012).

Por ello, los acuíferos contienen gran cantidad de agua potable en el mundo, además son fuente fija en muchas regiones áridas, que incluso con lluvias no hay potabilidad del líquido vital.

Las aguas subterráneas se encuentra en una situación de riesgo progresivo, debido a factores tales como el crecimiento constante de la demanda en mega conglomerados urbanos, la explotación descontrolada y la contaminación (Peralta & López, 2012, p. 80). La Figura 9 muestra el proceso de recarga de los acuíferos, con el agua por los diferentes estratos, afloramientos y extracciones.

Figura 9

Aspectos básicos de las aguas subterráneas



Nota. Adaptado de (Ingeoexpert, Guimerá, & Vilanova, 2021) Esquema básico del flujo de agua en el medio geológico y los diferentes componentes en función del contenido de agua y la facilidad de circular por el medio.

Se considera que el agua subterránea es un recurso en transición porque su explotación comenzó en el siglo XX y esto dio como resultado una gran cantidad de beneficios, pero también llamó la atención de los expertos para evaluar la sostenibilidad (Van der Gun, 2012, p. 3). En cuantía es mayor a las encontradas en la superficie terrestre, además, existen variedad por estar suspendidas, estado freático, confinadas y artesianas.

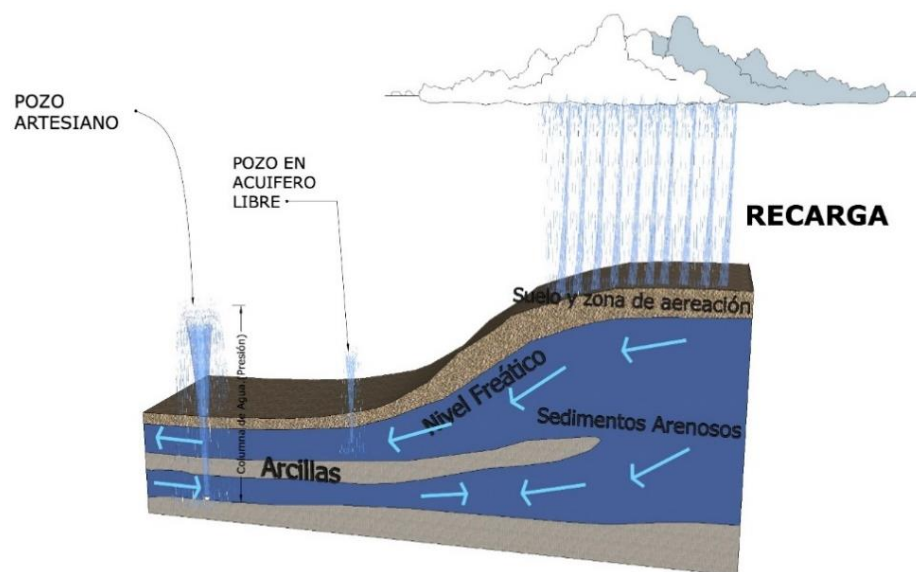
En las últimas décadas científicos han destacado el progreso en la recolección de información sobre los sistemas de aguas subterráneas, entendiendo su función, al observar cambios en el tiempo y en la identificación de opciones para mejorar sus beneficios y las amenazas que deben abordarse para salvaguardar sosteniblemente los recursos (Van der Gun, 2012, p. 31).

Se estima que el 20% de los acuíferos mundiales es sobreexplotados, con graves consecuencias, como el hundimiento del suelo y la intrusión salina, adicionalmente la disponibilidad de agua se enfrenta a las presiones de contaminación (UNESCO, 2015b, p. 2).

El agua de precipitación que en su descenso por el suelo, ocupa parcial o totalmente los poros o fisuras de la superficie y rocas, se denomina infiltración (Collazo Caraballo & Montaña Xavier, 2012), no es posible captar y aprovechar toda la lluvia. Además de la porción que regresa al cielo como vapor, una parte significativa se adentra en la tierra para convertirse en subterránea (Yapa & Berkeley, 2013).

Es prioritario identificar las zonas en donde los acuíferos se recargan para protegerlas. (Corpochivor & UPTC, 2014) La forma natural de recargarlos es por medio de la precipitación, sin embargo, en la actualidad las diferentes sociedades han impactado de manera perjudicial al sistema, con la impermeabilización del suelo, deforestaciones, contaminación de subsuelos, sobre explotación, así mismo el cambio climático hace variaciones en el régimen de lluvias, toda vez que se presentan fuertes en periodos cortos, sin que la superficie tenga el tiempo suficiente para infiltrar el agua.

En la Figura 10 se muestra el ciclo de las aguas subterráneas con la extracción por medio de un pozo artesiano (agua sale de forma libre a la superficie).

Figura 10*Recarga de acuíferos*

Nota. Adaptado de http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_21/10_fig10-3.jpg

Hay insuficiente conocimiento sobre el comportamiento del recurso hídrico en la zona de recarga de los acuíferos, por parte de la mayoría de grupos poblacionales, pues la invisibilidad del agua subterránea aumenta el riesgo de contaminación haciendo más difícil su defensa y manejo. El líquido vital está concebido en el imaginario de las comunidades de manera separada, evitando articular la interdependencia que se genera en los sistemas páramos-aguas superficiales-aguas subterráneas, de ahí que se desarrollen acciones aisladas, atomizadas, que no faciliten su protección (Monroy Vargas et al., 2010).

No siempre el agua subterránea es apta para consumo directo, ya que durante su circulación a través de las rocas pueden cambiar su calidad ejemplo: (calichosa) o puede contaminarse al estar en contacto con sustancias como pesticidas, hidrocarburos, materia fecal. Los análisis de laboratorio permiten determinar sus características y su aptitud para gasto, regadío, uso industrial, o la necesidad de utilizar técnicas de tratamiento para mejorarla (Corpochivor & UPTC, 2014).

En la práctica resulta complejo y a veces es imposible determinar el límite por encima del cual la explotación se transforma en sobreexplotación. A este caudal normalmente se lo denomina de seguridad, seguro, o safe yield y su determinación es complicada porque además de estar en equilibrio con la recarga no debe generar efectos indeseables como salinización, por ascenso o invasión lateral; contaminación por migración descendente (ejemplo nitratos NO₃); consecuencia por compactación de suelos arcillosos; e interferencia con puntos aledaños de extracción, entre otros (Auge, 2006, p. 6).

La mayor parte de los recursos hídricos utilizables en el planeta, se encuentran en el subsuelo y Colombia presenta similares condiciones con potencial de aguas subterráneas; INGEOMINAS resalta en el Mapa Hidrogeológico (1986) y en el Atlas Hidrogeológico (2004), que aproximadamente el 75% del territorio cuenta con zonas favorables para el almacenamiento de agua subterránea. Así mismo a nivel orientativo y de pronóstico, dicha entidad estimó en el año 1997, almacenamientos dinámicos de 10,5Km³/año en las áreas con mejores posibilidades de explotación, mostrando en los acuíferos una alternativa de abastecimiento a emergencias naturales como sequías originadas por el fenómeno de El Niño (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010, p. 27).

Una de las amenazas que encontramos es la contaminación por parte de las zonas urbanas y agrícolas que se generan en el país, esto lleva a la disminución de las aguas subterráneas y Tunja no es la excepción a este inconveniente.

Por lo anterior, los esfuerzos hacia la integración de la gestión de las aguas subterráneas para el abastecimiento de agua potable son necesarios para una adecuada sostenibilidad. Con el fin de identificar y minimizar los impactos negativos al medio ambiente y la población como es el caso del acuífero de Tunja, ciudad que cuenta con 200 mil habitantes y el de la isla de San Andrés, que tiene 100 mil aproximadamente.

4.4.1 Importancia del Agua Subterránea

El agua dulce es de vital importancia para la vida y sustento de los seres humanos, por ello la Asamblea General de la ONU lo declaró como un derecho humano en el año 2010, es indispensable garantizar la disponibilidad, acceso, calidad entre otros, que implica beneficios exponenciales para la salud, alimentación y economía de las sociedades.

El agua subterránea es dulce, apropiada para el consumo por los seres humanos, muy utilizada en suministros rurales y urbanos especialmente donde el acceso a la superficial es limitado y/o insuficiente.

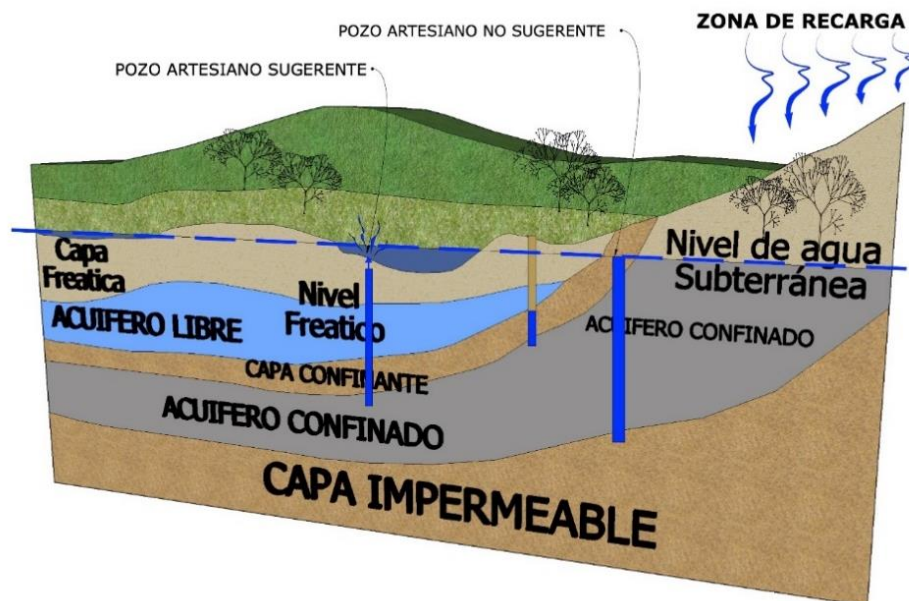
4.4.2 Desplazamiento del Agua en el Acuífero

Los efectos de la gravedad hacen que el agua se mueva en el acuífero desde la zona de mayor elevación hasta la de menor, dependiendo entre otros de la porosidad del medio, esto es causado por las diferencias de energía del recurso ubicada en dos puntos del sistema, allí la velocidad del líquido es muy lenta y por tanto, el término cinemático muy pequeño y por este motivo se desprecia (Ingeoexpert et al., 2021).

4.4.3 Tipos de Acuíferos en Función del Nivel Piezométrico

Un determinado pozo, en función de la posición del nivel piezométrico que esté midiendo y de las formaciones permeables y semipermeables, se pueden clasificar como confinados, no confinados (libres) y confinados surgentes.

Cuando el nivel freático está en contacto con la atmósfera, es un acuífero libre; si está por encima del techo es confinado. Los pozos pueden ser ranurados en acuíferos libres o confinados. Si el nivel piezométrico está por encima del nivel del terreno, entonces el pozo es surgente. Puede haber zonas saturadas del terreno que no estén conectadas al sistema de flujo general, y entonces hablamos de acuíferos “colgados” (Ingeoexpert et al., 2021), como se representa en la Figura 11.

Figura 11*Tipos de Acuíferos*

Nota. La figura muestra la distribución dentro de un acuífero. Adaptado de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2584/html/ap12_acuiferos.jpg

Con el fin de establecer la cantidad de agua infiltrada y la recarga de los acuíferos es necesario utilizar piezómetros, pozos para el monitoreo del nivel freático, temperatura y conductividad eléctrica y de forma periódica realizar pruebas de bombeo o con ayuda de la tecnología disponer de sensores que brinden información constante.

4.4.4 Balance Hídrico del Suelo

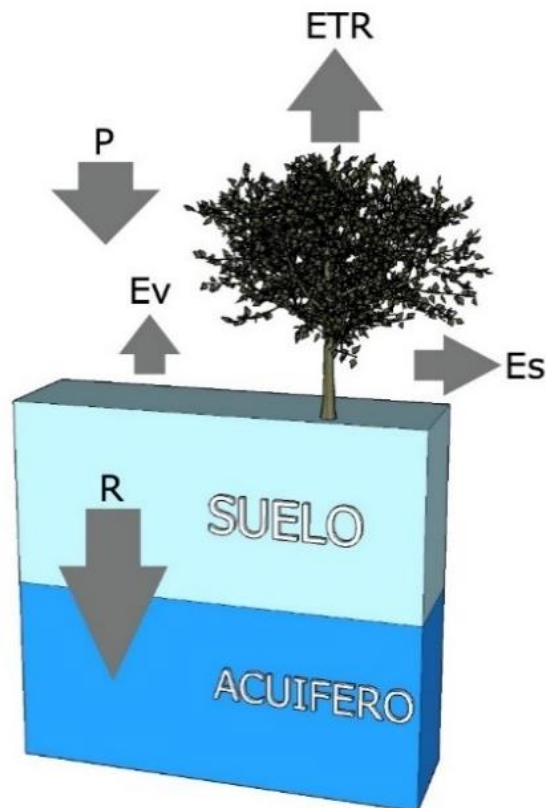
La recarga de acuíferos proviene principalmente de la precipitación, también es posible por la conexión que exista entre masas de agua superficiales y/o subterráneas, así mismo se puede dar el caso de extracción y retorno parcial posterior a riegos, e infiltración por pérdidas en las redes de la misma.

Para el caso del presente estudio se enfoca en la recarga de acuíferos de forma natural y artificial por medio de lluvia sin desconocer las otras que por medios naturales tiene el subsuelo. En Figura 12 se muestra el balance de agua en el suelo, como herramienta para establecer la recarga R, P es

la precipitación, ETR la evapotranspiración a través de las plantas, Ev la evaporación directa desde el suelo y Es la escorrentía superficial.

Figura 12

Balance en el suelo



Nota. La imagen un balance simplificado del agua en el suelo con la recarga del acuífero.

4.4.5 Intrusión Marina

La demanda de agua dulce en las zonas costeras e islas está aumentando debido a la población y el crecimiento del turismo. Los acuíferos costeros son un recurso hídrico primordial en estas áreas, pero, el aumento de las extracciones puede provocar la entrada de agua de mar conocida como intrusión salina, por lo que intentar extraer la máxima cantidad antes de experimentar el fenómeno es muy arriesgado (Haie, Engineering, li, Ist, & Pais, 2007, p. 1).

4.4.6 Impermeabilización del Suelo.

Las superficies impermeables son cualquier material que impide la infiltración de las aguas de escorrentía superficial hacia estratos subyacentes. En las parte urbana existe crecimiento exponencial de áreas impermeables, el cual está directamente relacionado con las actividades humanas y la construcción de viviendas, edificaciones, estacionamientos, carreteras y otras estructuras que disminuyen la capacidad de permeabilidad de los suelos, con el aumento del espacio urbano existen menos zonas permeables (Chester & Gibbons, 2007).

4.4.7 Capacidad de Recarga

Aunque existe bastante agua en el suelo, es necesario usarlas a tasas moderadas garantizando la reposición de las mismas ya sea de forma natural y/o artificial.

La fuente natural de recarga y de agua dulce en la tierra es la lluvia, con impactos ambientales y cambios en los ciclos y tiempos de las precipitaciones se está viendo afectada la capacidad de los acuíferos de recargarse.

A nivel mundial, aproximadamente el 60% de las lluvias retorna a las nubes y el restante llega al suelo en forma de escorrentía, con un promedio universal de 0.8m/año tendríamos 0.3m/año para la recarga de los acuíferos, uso y alimentar ríos.

4.5 Plan de Desarrollo Sostenible y Gestión del Agua

La gestión integral del agua es un aspecto clave para el progreso sostenible, respeto a los derechos humanos y la promoción de una economía verde que reemplace el modelo de desarrollo intensivo en carbono que ha resultado en la crisis ambiental del cambio climático (Inmet et al., 2016).

Enunciado en capítulos anteriores, el cambio climático impacta en la disponibilidad de agua potable a las poblaciones, con la variación de precipitaciones, aumento de temperaturas, amenazas como inundaciones, sequías prolongadas, intrusión marina en las zonas costeras entre otras.

A modo señala Avila Garcia y Vivar Arenas, sobre el manejo del agua “entendido como el uso y aprovechamiento desde su entrada, procesamiento/consumo y salida de los centros urbanos, el cual está mediado por aspectos sociales y de poder en diferentes escalas especiales: centro urbano y entorno natural y rural” (2018, p. 4).

Las aguas subterráneas son vitales para la vida y la seguridad alimentaria, especialmente en las economías agrícolas. A nivel mundial proporciona aproximadamente el 50% del agua potable, el 40% de la demanda industrial y 20% de la utilizada para riego (Qureshi, A.S., Ahmed, Z.U., Krupnik, 2015, p. 9).

La gestión del agua con autorregulación asegura que la demanda no supere la disponibilidad en cuencas o acuíferos y promueve soluciones integrales que permitan un crecimiento sostenible. Satisfacer el requerimiento por los usuarios requiere la implementación de cortos, medianos y estrategias a largo plazo.

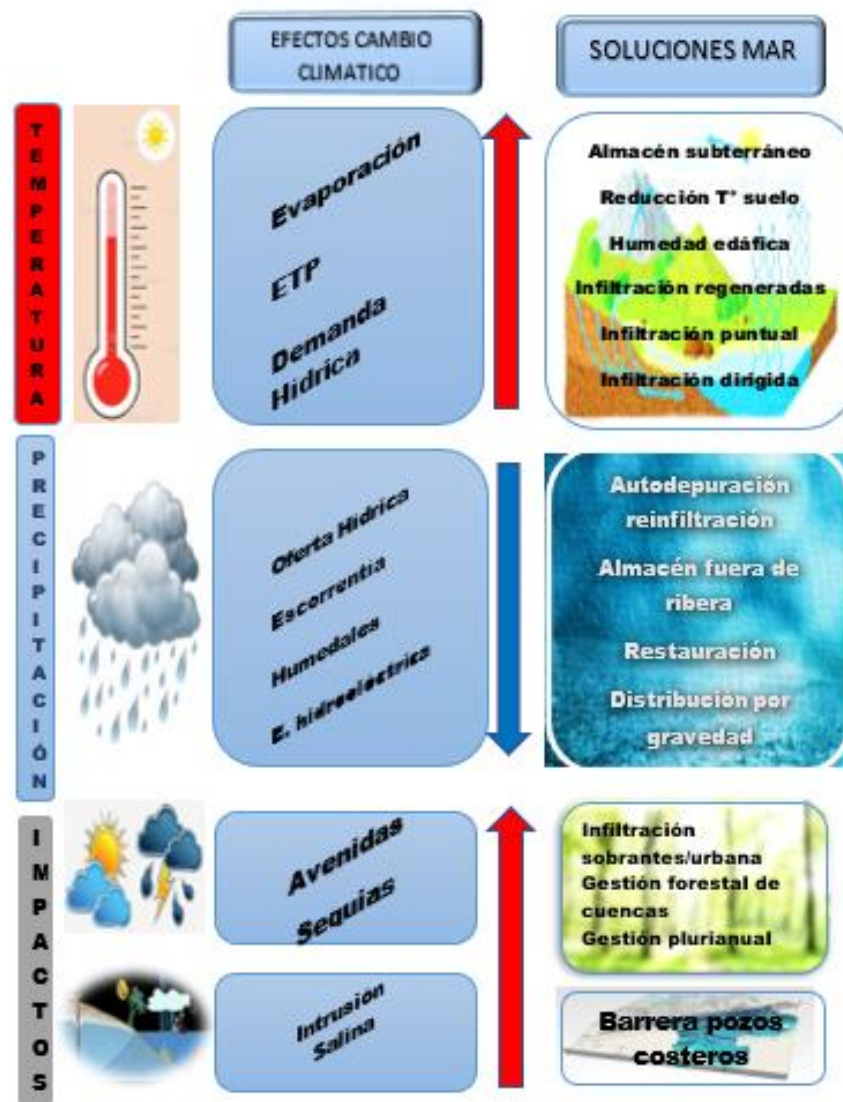
La comunidad internacional ha sido testigo que la Gestión de la Recarga de Acuíferos (MAR) es una herramienta útil para que los usuarios del agua y los tomadores de decisiones implementen acciones concretas hacia la dirección sostenible de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (Fernández Escalante, Navarro Benegas, Guerrero Salazar, & Rojas Vega, 2019, p. 101).

Estos nuevos esquemas de gestión del agua han desarrollado e implementado hasta ocho diferentes tipos de métodos de recarga de acuíferos gestionados: estanques de infiltración (pozas), pozos, pozos con galerías, canales, presas de retención / infiltración, filtración a través del lecho del río (RBF), infiltración campos (áreas temporalmente inundadas) y Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS). La mayoría de estas tipologías están presentes en sectores de la cuenca media, aunque las posibilidades son mucho mayor (Fernández Escalante et al., 2019, p. 201).

En la Figura 13 muestra efectos originados con el cambio climático y posibles soluciones que se pueden presentar con la utilización de recarga gestionada de acuíferos (MAR).

Figura 13

Aspectos variables por cambio climático y la recarga gestionada de acuíferos



Para un manejo adecuado del líquido vital se requiere de una evaluación de su vulnerabilidad en el contexto del cambio climático, procesos de sobreexplotación y deterioro de la calidad, para garantizar una correcta gestión hídrica que balancee la oferta, la demanda, la cantidad y calidad del recurso de acuerdo con las características del acuífero estudiado (Bedoya & Carmona, 2010, p. 2).

Por lo antes expuesto, es necesario tomar y plantear una serie de reglas y acciones a mediano y largo plazo que permitan el cuidado y conservación de las aguas subterráneas, proponiendo medidas

para mitigar la problemática ambiental relacionada con la escasez y/o manejo del agua potable en zonas abastecidas por acuíferos.

4.5.1 Definición y Adquisición de Áreas de Importancia Estratégica de los Acuíferos

Adquirir parcial y/o total por parte del estado las zonas de recarga de los acuíferos identificadas por las corporaciones autónomas, posteriormente realizar aislamiento perimetral preferiblemente con cerca natural.

Realizar estudios puntuales de cada zona identificando la necesidad de reformación y monitoreo de régimen de lluvias, filtración y demás aspectos que permita la identificación temprana de problemáticas, para ello es necesario la continuación y precisión en la delimitación de acuíferos, definición y normalización de áreas de extracción y restricción de aguas subterráneas, protección de las fuentes, toma de medidas sancionatorias por la mala utilización del recurso.

4.5.2 Implementar de Soluciones de Conservación y Cuidado de Acuíferos a Nivel Mundial

La sobreexplotación de la extracción de agua subterránea para cumplir las demandas domésticas y de riego a menudo conducen a una mayor invasión de la interfaz del agua de mar en el acuífero. La extensión de esta intrusión salina es la principal fuente de deterioro de la calidad de las aguas subterráneas en las zonas costeras. Por lo tanto, encontrar alternativas para controlar este desequilibrio dinámico se ha convertido en un punto de preocupación de tiempos modernos. Se han propuesto varios métodos, tales como, reducción de las tasas de bombeo, uso de barreras subterráneas, recarga artificial y/o combinación de estas técnicas (Javadi, Akbar; Hussain, Mohammed S.; Sherif, 2015, p. 1).

Es necesario desarrollar metodologías de gestión de retiros para determinar el número de ubicaciones viables para sistemas de extracción y las cantidades de líquido que se pueden bombear de los acuíferos costeros mientras proteger los pozos de la intrusión salina, para satisfacer la demanda, maximizar los beneficios económicos y controlar la intrusión de agua salada (Haie et al., 2007, p. 1).

Los desafíos actuales del suministro de agua requieren investigación interdisciplinaria que combine aspectos geológicos, hidrogeofísicos, petrofísicos y técnicas hidráulicas, adaptadas de los marcos de modelización de yacimientos de petróleo y gas; estos deben utilizarse conjuntamente con el fin de evaluar las complejidades de los sistemas acuíferos y optimizar el desarrollo de nuevas fuentes (Hernández-Espriú et al., 2017, p. 1).

4.5.3 Alternativas de Recarga Gestionada de Acuíferos

De acuerdo con investigadores como Fernandez-Escalante, la recarga gestionada de los acuíferos (MAR), constituye uno de los grupos de medidas de gestión hídrica más exitosas para combatir frontalmente los efectos adversos del cambio climático (2018, p. 1).

La recarga artificial es una idea que ha surgido en los últimos 20 años como una valiosa herramienta de gestión del agua para crear frente a los desafíos del suministro de la misma. En un esfuerzo por mantener la condición del nivel freático en equilibrio, se están implementando esquemas de recarga artificial en varias partes del mundo. Así mismo la del agua subterránea se logra colocando agua superficial en cuencas, surcos, zanjas u otras instalaciones donde se infiltra en el suelo y se mueve hacia abajo para recargar los acuíferos (Vaqharfard & Dashtpagerdi, 2014).

El concepto de recarga artificial se conoce desde hace mucho tiempo. La práctica comenzó en Europa durante principios del siglo XIX (Sultana et al., 2010).

En la actualidad, la humanidad está enfrentando diferentes retos en materia climática a causa de sus propias acciones. Dentro de los efectos del cambio climático se encuentra la nueva distribución del régimen hídrico afectando principalmente al acceso y cantidad de agua potable en zonas donde dicho recurso era más escaso, ya sea por el aumento de población o disminución de la cuantía disponible, por lo tanto, se abre a nivel mundial la necesidad de incrementar la disponibilidad de recursos hídricos para satisfacer las demandas de las comunidades. En este conjunto de técnicas tenemos la recarga artificial o gestionada de acuíferos.

Desarrollar reservorios de suministro de agua subterránea es un enfoque ventajoso aplicable al cumplimiento de los objetivos de gestión de la misma. El almacenamiento y la recuperación de acuíferos (ASR) es una tecnología de inyección y posterior extracción que se utiliza para aumentar la acumulación del abastecimiento del líquido a través de pozos de irrigación (Gibson et al., 2018).

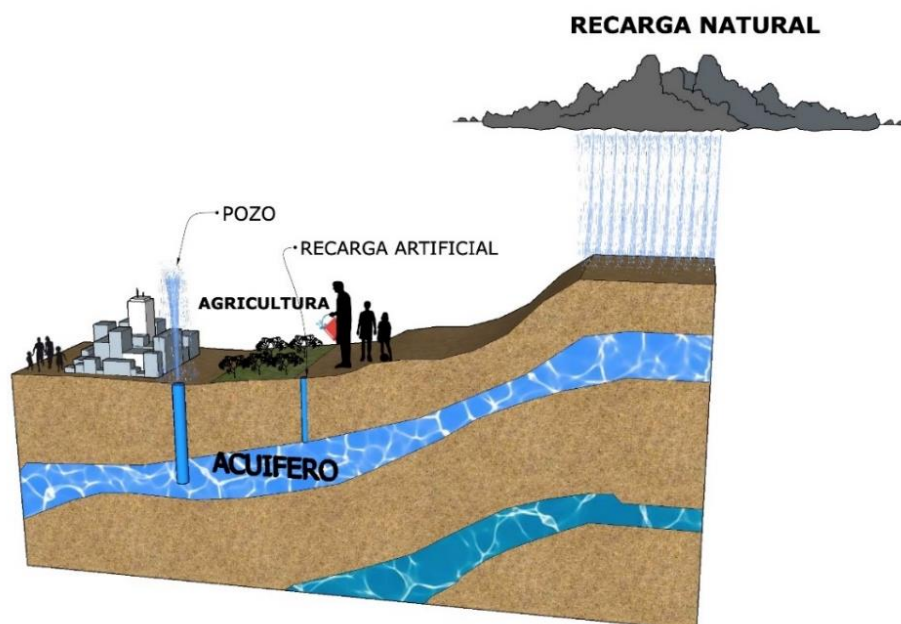
Las opciones relativas a cómo actúa la recarga artificial a modo de medida de adaptación reduciendo los impactos identificados, sin pretensiones de ser estrictamente exhaustivos, se basan en lo siguiente: uso del acuífero a manera de almacén subterráneo; aumento de la humedad del suelo y ascenso del nivel freático, especialmente intensamente explotados; posibilidad de infiltrar aguas regeneradas para su posterior reutilización empleando a este como sistema de depuración adicional (economía circular); almacenamiento de agua en márgenes de las riberas e incremento de la infiltración bajo zonas urbanizadas; distribución del agua subterránea a lo largo del acuífero por gravedad, sin necesidad de conducciones; infiltración de excedentes hídricos mediante mecanismos de detención y retención infiltración y SUDS y creación de barreras hidráulicas positivas en lugares costeros contra la intrusión marina (Fernandez-Escalante et al., 2018).

La cuantía de recarga natural varía mucho de una región a otra. Las ventajas de la recarga artificial son muchas. No requiere grandes estructuras de almacenamiento y mejora el rendimiento confiable sin pérdidas por evaporación. Perfecciona la calidad del agua por dilución y procesos de naturales. No hay riesgo de inundación superficial y, por lo tanto, no existe desplazamiento de población local y pérdida de cultivos. La recarga artificial es respetuosa con el medio ambiente y económicamente viable y rentable. También utiliza y reduce la escorrentía superficial excedente y ayuda a reducir los desafíos de eliminación de escorrentías en las ciudades (Sultana et al., 2010).

En la figura 14 nos muestra la forma de recarga natural y artificial del acuífero, usos, además ilustra la necesidad de educación a las nuevas generaciones sobre el cuidado de los recursos.

Figura 14

Representación de los impactos de la Recarga Gestionada y natural



Para el caso del acuífero de San Andrés se ejecutó un proyecto de recarga artificial, con la ejecución de para aumentar la cantidad de agua infiltrada al subsuelo, y con un control en los niveles piezométricos se determinó el aumento de la disponibilidad en épocas secas.

Una de las desventajas que muestra este tipo de proyectos es la poca disponibilidad de tierras con el fin de ampliar su campo de infiltración, así como la limitante de recursos que permitan investigación e identificación de más sectores e infraestructura de conducción y lagunas.

4.5.4 Recarga de Acuíferos de Forma Natural y Protegida

La recarga de acuíferos cumple con las necesidades futuras de almacenamiento de agua, siendo una estrategia práctica de mitigación que puede proporcionar una gran capacidad de provisión de agua, restablecer hábitats ambientales, prevenir la intrusión salina, entre otros. Estas prácticas implican el uso de inyección y recuperación de pozos para agregar líquido excedente al subsuelo para su posterior extracción, generalmente durante la demanda máxima o para fines de emergencia (Gibson et al., 2018).

4.5.5 Alternativas de desalinización

Los recursos hídricos no convencionales como desalinización, reciclaje de aguas residuales y tormentas, son necesarios para cerrar la brecha de demanda. Sin embargo, la primera se enfrenta a restricciones financieras y disponibilidad de energía, reutilizar aguas residuales. La recarga artificial con afluentes aún se encuentra en etapas tempranas por la calidad de los mismos para reutilización directa en riego o recarga artificial, sobre el particular existen experiencias negativas en cuanto a la calidad del agua. No obstante, la utilización de aguas pluviales tiene menos cantidades potenciales que las de desalación y reutilización de afluentes, pero posee la ventaja de ser más limpio y adecuado para la recarga artificial del acuífero (Hamdan, 2012, pp. 16–21).

4.5.6 Componente de Actores Gubernamentales

Corresponde a las autoridades locales desarrollar e implementar políticas y planes de uso y conservación de los recursos, que deberían incluir la preservación de la tierra agrícola (y cualquier superficie que sustenta la biodiversidad, la calidad del agua y las aguas subterráneas recarga), incluidas las zonas frágiles y costeras y otras en necesidad de protección (UN-Habitat, 2016).

Una de las grandes limitaciones en el manejo de recursos hídricos es la gobernabilidad para que las políticas sean efectivas y eficaces por el bien de las comunidades que necesitan del recurso, por ello el marco normativo del país es limitado y poco exigido en los diferentes escenarios regionales donde su aplicación impactaría de manera directa en la calidad y accesibilidad.

Autores como Ghielmi afirma, que implementar métodos de alcantarillado, principalmente para las poblaciones que se encuentran en las regiones de alta vulnerabilidad de la zona de estudio, el control de la construcción de casas y urbanizaciones en las zonas de recarga del acuífero. En caso de no poder evitar la urbanización de estas áreas, exigir la instalación de sistemas de alcantarillados y asegurarse de contar con tratamiento (2008, p. 82).

4.5.7 Políticas de Conservación de Zonas de Recarga

La creciente preocupación de que, en el futuro, la escasez del líquido vital podría intensificar la lucha por el poder para obtener acceso como su reglamentación, y que el resultado final sea el desplazamiento de la población local y de prácticas centenarias relacionadas con el uso del agua. Por consiguiente, es de fundamental importancia que los gobiernos regionales y nacionales documenten y atiendan estos casos cuando se están analizando y regulando los usos y la distribución de la misma, así como las cuestiones relativas a la tenencia y control (Vuille, 2013).

Un factor significativo y determinante para la recarga exitosa de los acuíferos es determinar las áreas de recarga artificial para su adecuada conservación y uso (Vaqharfard & Dashtpajardi, 2014).

Se necesita un conjunto de políticas de gestión y retiro bien establecidas, para lograr una cometido y operación más eficiente de estos acuíferos. La gestión de las aguas subterráneas se plantea como la maximización del beneficio neto obtenido del líquido vital, uso sujeto a limitaciones de no intrusión de agua salada frente a los pozos y bombeo restricciones de límites de capacidad (Ferreira Da Silva, Naim, Cunha, & T., 2001, p. 8).

4.5.8 Riesgos de Impacto Colateral Coronavirus 2019 en el Agua Potable

En la etapa final de la elaboración de este trabajo estuvo marcado con una situación de pandemia a nivel mundial conocida (COVID 19) del cual Colombia no fue ajena, impactando la salud de la humanidad y la economía principalmente, sin profundizar en la prestación de servicios públicos como el agua potable.

En este subcapítulo se hace referencia a tal situación, resaltando el impacto y medidas propuestas que involucren el uso de agua potable como bien fundamental.

La Constitución Política de Colombia avala el derecho a la salud, igual que al saneamiento básico, dando por descontado el acceso al agua potable de todos sus ciudadanos a cargo del Estado. Por

ello le corresponde organizar, dirigir y reglamentar la prestación de servicios de salud a los habitantes y de saneamiento ambiental conforme a los principios de eficiencia, universalidad y solidaridad.

También, instituir las políticas para la prestación de dichos servicios por entidades privadas, y ejercer su vigilancia y control. Así mismo, establecer las competencias de la Nación, las organizaciones territoriales y los particulares y determinar los aportes a su cargo en los términos y condiciones señalados en Constitución Política de Colombia.

Artículo 356. Los recursos del Sistema General de Participaciones de los departamentos, distritos y municipios se destinarán a la financiación de los servicios a su cargo, dándoles prioridad a la asistencia de salud, los servicios de educación, preescolar, primaria, secundaria y media, y servicios públicos domiciliarios de agua potable y saneamiento básico, garantizando la prestación y la ampliación de coberturas con énfasis en la población pobre.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) dentro de sus múltiples recomendaciones para la atención y mitigación de la pandemia, acogidas en su mayoría por el gobierno nacional, suplicó entre otras el confinamiento de ciudadanos en sus hogares, así como lavado de manos de forma permanente (cada tres horas máximo). Tal situación involucra una capacidad de respuesta fundamental por parte de los prestadores de servicios públicos en ciudades, destacando:

- La medida de prevención del lavado de manos máximo cada tres horas tiene un gasto aproximado de 0.35litros, así como incrementar el número de duchas diarias, incrementa en 200litros por habitante día.
- Pone a prueba toda la infraestructura instalada propia para el suministro de líquido potable en cada uno de los territorios, así los demás servicios relacionados como alcantarillado, electricidad (si los casos de estudio la necesitan para extraer el agua de los acuíferos).

- Pone a prueba la capacidad de respuesta de los prestadores de servicios, en situaciones críticas como falta del líquido, rupturas de tuberías, conexiones, continuidad en el servicio, entre otros.
- Alto riesgo de colapso de los sistemas por eventos naturales como lo ocurrido en el municipio de Chía por un sismo del día 28 de marzo de 2020, que en medio de la atención del Covi 19 se averió la tubería maestra que suministra agua al casco urbano que cuenta con más de 100 mil habitantes.

4.5.9 Situación Particular de San Andrés

La generación eléctrica en la isla se hace por medio de motores diésel con altos costos económicos y ambientales, incluye la extracción de agua del acuífero, en la actualidad existen proyectos que buscan utilizar energías limpias como la eólica y la solar, pero no están masificados (Reyes Hernandez & Castillo Forero, 2017).

El sistema de redes de distribución de la isla es limitado, con la existencia de viviendas con pozos de extracción que no controlan el caudal. Existen temporadas especialmente en verano que los niveles del acuífero son insuficientes para atender la demanda y con la contingencia esta situación se agudiza (Coralina, 2005). Con la cuarentena establecida y tenido en cuenta que la principal actividad de la isla es el turismo, lo que genera un menor impacto en el consumo de agua.

4.5.10 Situación Particular Tunja

La fuente de agua para potabilizar principalmente proviene por gravedad desde el embalse Teatinos, lo cual es positivo por la baja utilización de energía eléctrica, sin embargo, la tubería de conducción está terminando su vida útil.

El agua de los pozos profundos construidos en la ciudad se utiliza en emergencias, pero ellos por sí solos no cuben la demanda total, y en caso de hacerlo sería una situación extrema, en la actualidad se extrae el 40% de la concesión dada por la autoridad ambiental (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016a).

4.5.11 Enseñanzas y Propuestas a Aplicar en los Entornos de San Andrés y Tunja

Las siguientes son propuestas que en marco de la emergencia y con la experiencia relacionada pueden ayudar a salvaguardar la vida, manteniendo el suministro de agua potable a las comunidades. No es desconocido que se necesita disponer de recursos económicos importantes para llevarlos a feliz término, pero que se hace necesario y responsable dar inicio a un dialogo nacional en la materia, por tanto, se propone entre otros:

La importancia del recalcu de la cantidad de agua que necesita un individuo, donde se garantice su uso en situaciones de contingencia. Para tal fin el estado y las empresas prestadoras deben garantizar la ampliación de la infraestructura, garantizando la continuidad del servicio, así como la disponibilidad del recurso independientemente de la época del año.

Creando entre otras propuestas un marco regulatoria para que las poblaciones dispongan como mínimo una línea alterna para el suministro de agua en caso de situaciones de emergencia, otro que permita apropiar recursos (ahorro) para contingencias relacionadas con agua potable y saneamiento básico.

Asimismo promover por alternativas de energías limpias como la eólica o solar para la puesta en marcha de equipos necesarios para extracción y potabilización de agua en los casos que se necesite, con ayuda de la tecnología ampliar la optimización de procesos relacionados con el suministro, monitoreo en tiempo real, control de caudales, consumos y su variación, con alertas tempranas de niveles en las fuentes y redes.

Lo anterior, atendiendo que el agua en una ciudad tiene características de metabolismo urbano, con un sistema abierto con entradas y salidas de flujos, materia y energía entre el centro urbe y su entorno. Es un socio ecosistema complejo que se acelera conforme crecen las ciudades y sus economías, por el aumento de la demanda del recurso (Avila Garcia & Vivar Arenas, 2018, p. 27).

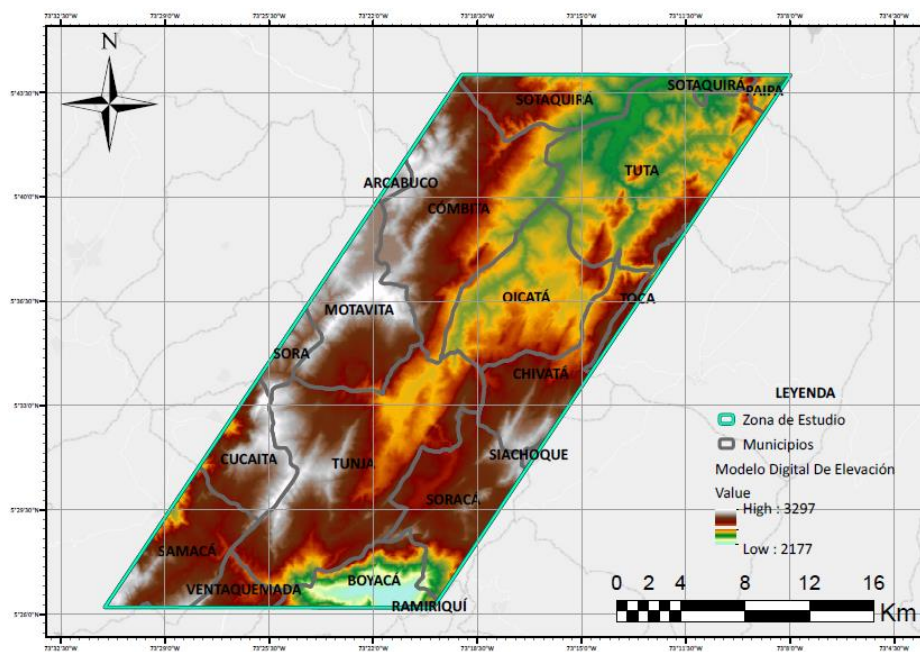
5 Casos de estudio

5.1 Acuífero de Tunja

Esta cuenca representada en la Figura 15 comprende 14 municipios: Samacá, Cucaita, Sora, Motavita, Cóbbita, Oicatá, Chivatá, Soracá, Ventaquemada, Boyacá, Tunja (capital de departamento y mayor población), Sotaquirá, Paipa y Tuta.

Figura 15

Planta con Elevaciones Sistema Acuífero Tunja



Notas: Las alturas sobre el nivel del mar de la zona de estudio oscilan entre los 2177 y 3300 metros.

La Corporación Autónoma Regional de Boyacá realizó el plan de manejo ambiental del sistema del acuífero de Tunja acorde a las normas que en la materia rigen en Colombia para la época de la formulación (Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, compilado en el 1640 de 2012).

Existen varios estudios referentes al sistema resaltando el realizado por Corpoboyacá y el Consorcio Hidroboyacá en el 2016, en la cual se destaca una cuenca hidrogeológica, que por magnitud

posee 3 subcuencas del sinclinal de Tunja, Albarracín y una falla al oriente de Chivatá cumpliendo con un área total de 627Km² y específicamente 373.87km² de cuenca hidrográfica.

La ciudad representativa del área de estudio en población, centros administrativos, economía, extracción de aguas subterráneas es el municipio de Tunja, “se ubica en cordillera Oriental, con alturas que van desde los 2.700 hasta 3.150m.s.n.m en la parte más elevada, con una extensión de 121.4km² y una temperatura de 13°C” (Alcaldía de Tunja, 2015, p. 13).

5.1.1 Representación del Acuífero en el Área

Manantiales. El acuífero de Tunja tiene una variedad de manantiales los cuales están distribuidos a lo largo y ancho de la cuenca y son aquellos que poseen flujos de agua subterránea que emerge desde el subsuelo. Se muestran dos en las figuras 16 y 17, el tipo de manantial depende del modo de emerger el fluido a la superficie teniendo en cuenta cuya afluencia pende netamente de la estación del año y el volumen de lluvias que posee cada uno en su ubicación dentro de la cuenca (Corpoboyacá, 2015).

Figura 16

Manantial vereda tras del alto Tunja



Figura 17

Manantial vereda Pijaos Cucaita



Nota. Imágenes revelan nacimientos de agua en Tunja y Cucaita Boyaca. Tomado de Fotografía (Corpoboyacá, 2015, p. 9)

Aljibes. El acuífero de Tunja al igual que los manantiales posee una serie de aljibes los cuales son estructuras artesanales que alcanzan el nivel del agua y se profundizan por debajo de este, acumulando agua subterránea para ser extraída con facilidad.

Figura 18

Aljibe vereda Concepción



Figura 19

Aljibe vereda salvial motavita



Nota. Imágenes revelan nacimientos aljibes de agua en Motavita Boyaca. Tomado de Fotografia.

(Corpoboyacá, 2015, p. 11).

Estos se caracterizan por encontrarse cerca al acuífero principal no muy lejana a la superficie, es por esto cuya profundidad es bastante menor si se compara con los pozos profundos (Corpoboyacá, 2015).

Pozos. Estos se encuentran en el acuífero de Tunja como perforaciones del subsuelo las cuales son excavadas o taladradas, para poder extraer el agua. Esta extracción se puede realizar de manera natural o a través de un sistema de bombeo (Corpoboyacá, 2015). En la ciudad existen gran variedad de pozos que ayudan a abastecer el acueducto de la población.

Figura 20

Pozo profundo San Francisco Tunja



Nota. La imagen muestra el pozo sobre doble calzada ingresando por el sur a la ciudad.

Figura 21

Pozo profundo La Remonta Tunja

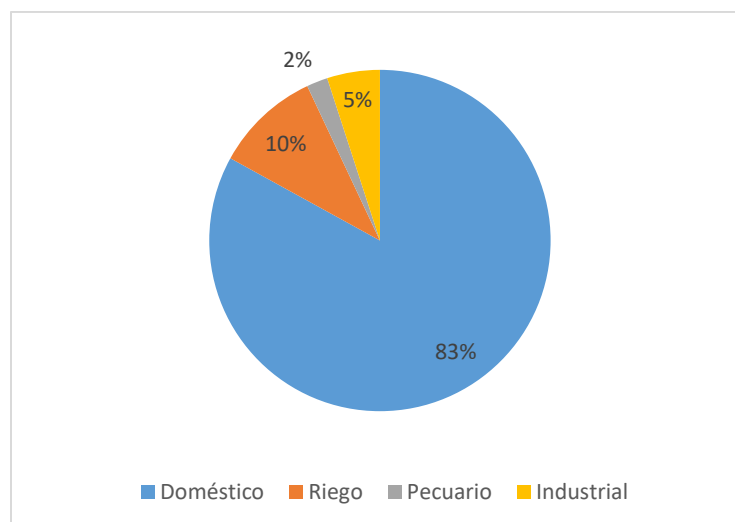


Nota. La imagen muestra pozo sector La Remonta ciudad de Tunja.

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica realizada se determinó que el recurso hídrico del acuífero de Tunja, tal como se puede apreciar en la Figura 22, distribuyéndose para la industria, riego, gasto pecuario y uso doméstico (Corpoboyacá, 2015).

Figura 22

Porcentaje de Usos del Recurso Hídrico Acuífero de Tunja



Nota. Uso del agua del acuífero en la ciudad de Tunja (Corpoboyacá, 2015).

Existen estudios que establecieron que el sistema estaba sobreexplotado (Monroy Vargas et al., 2010, p. 134), sin embargo en una actualización en el 2015 se determinó que el comportamiento había cambiado y la fuente subterránea tenía disponibilidad de almacenamiento para cubrir las necesidades de la población haciendo uso eficiente del mismo (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016b, pp. 8–10).

Así mismo, la administración municipal realizó estudios de factibilidad que tienen como objetivo abastecer más de 5.300 personas de 13 acueductos rurales con la construcción de un sistema denominado “Acueducto Regional de Occidente” alimentado por pozo profundo ubicado en la vereda de Runta (Occidente, Tunja, & Boyacá, 2015), lo cual agudizaría la situación de no tomar las medidas de conservación necesarias.

5.1.2 Características Geomorfológicas

El cuerpo de agua subterráneas de la zona de estudio, se ha denominado Sistema Acuífero de Tunja por diferentes actores, en el cual se identifican dos complejos uno de forma superficial y otro más profundo.

En el año 2016 fruto de un contrato entre Corpoboyacá y Consorcio Hidroboyacá se estableció que existen dos complejos acuíferos bien diferenciados:

El primero (más superficial) formado por rocas del Terciario, integrado por niveles de areniscas de la Formación Bogotá y Cacho. El segundo corresponde a un acuífero de mayor profundidad, combinado por piedras sedimentarias del Cretáceo, granulares tipo areniscas, friables y cementadas, de grano fino, fracturadas, compuesto en la zona de estudio por el Miembro Arenisca Tierna de la Formación Labor y Tierna y La Formación Plaeners (p. 130).

El Sistema de acuífero de estudio cuenta con un área aproximada de 338 kilómetros cuadrados ubicado en el departamento de Boyacá, cuya ubicación geográfica se muestra en la Tabla 1, ilustrado en la Figura 23.

Tabla 1

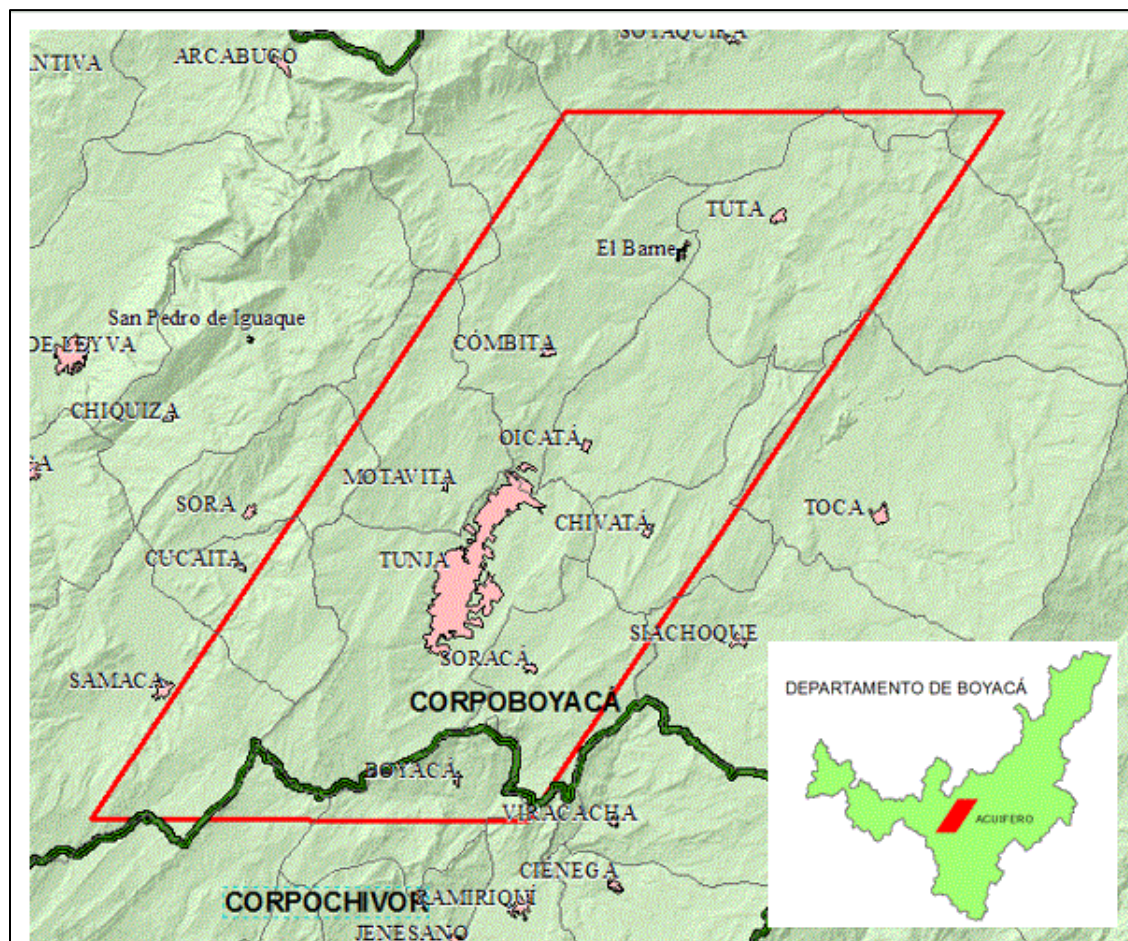
Ubicación geográfica del sistema acuífero de Tunja

Punto	Este	Norte
1	73°31'5,01939	5°26'12,9838
2	73°20'47,8528	5°26'12,3291
3	73°19'9,02636	5°44'6,39772
4	73°8'51,57540	5°44'5,48719

Nota. Tomado de (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2015)

Figura 23

Ubicación Sistema Acuífero de Tunja

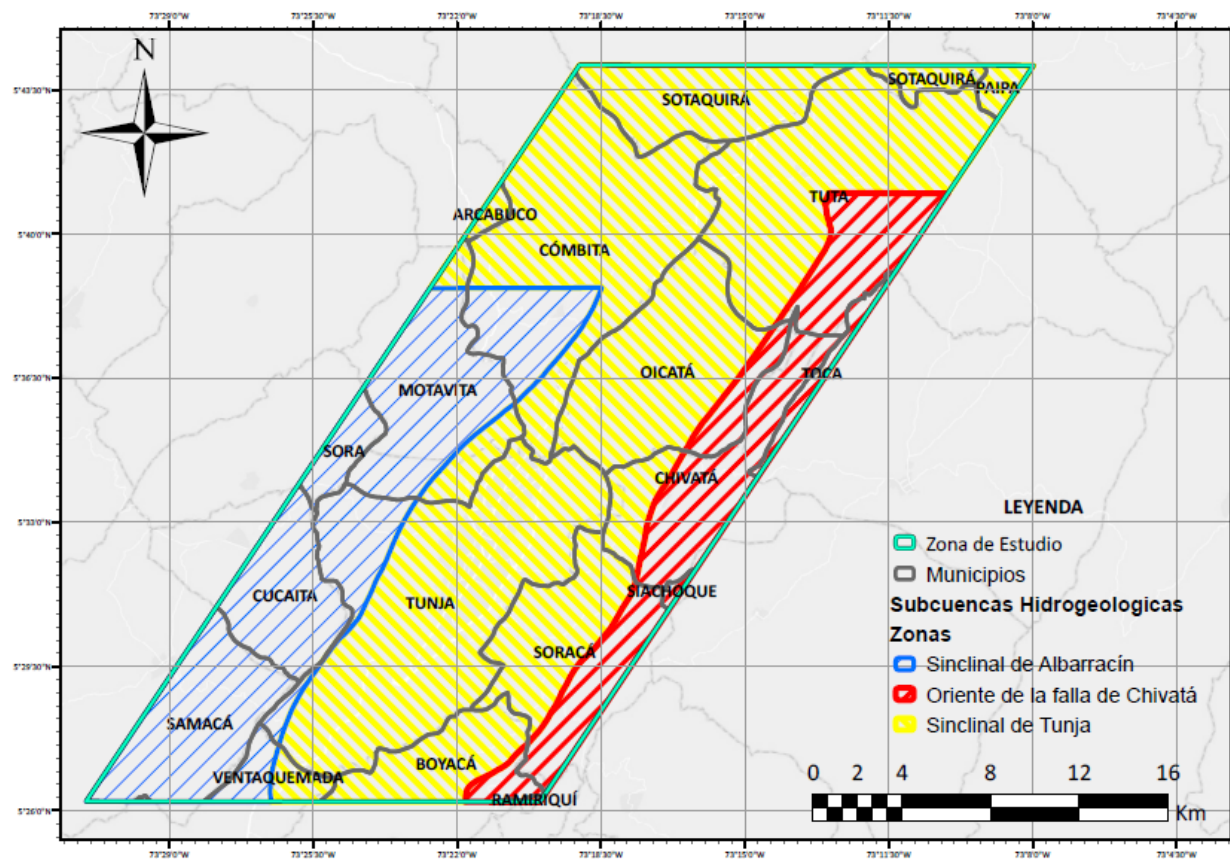


Nota. Tomado de (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2015, p. 7)

En la zona de estudio se presenta el sinclinal de Albarracín y de Tunja, así como la falla de Chivatá, delimitados en la Figura 24.

Figura 24

Sinclinales en área de estudio



Nota. Sinclinales presentes en la zona de estudio.

5.1.3 Climatología (Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración)

Los cuerpos de agua subterráneas de la zona de estudio, se ha denominado Sistema Acuífero de Tunja por los diferentes actores, en el cual se identifican dos complejos uno de forma superficial y otro más profundo.

En la Tabla 2 se muestran los datos y cálculos tomados y analizados de Corpoboyacá y Consorcio Hidroboyacá para obtener la infiltración con precipitaciones calculadas desde 1980 a 2012.

Tabla 2

Registros climatológicos sistema acuífero de Tunja

Año	Precipitación (m ³ /año)	Precipitación + Trasvase (m ³ /año)	Caudal de Salida (m ³ /año)	Evapotranspiración real (m ³ /año)	Infiltración (m ³ /año)
1980	255,942,934	262,250,134	24,413,443	192,514,147	45,322,544
1981	396,152,021	402,459,221	57,300,307	228,772,825	116,386,089
1982	321,674,497	327,981,697	37,399,277	213,009,866	77,572,554
1983	200,474,889	206,782,089	22,799,405	168,116,493	15,866,191
1984	310,398,880	316,706,080	23,286,010	209,191,589	84,228,481
1985	284,656,586	290,963,786	25,292,736	202,116,254	63,554,796
1986	338,454,176	344,761,376	43,537,824	217,545,440	83,678,113
1987	267,746,652	274,053,852	20,159,971	197,979,401	55,914,480
1988	308,334,057	314,641,257	37,705,478	211,657,745	65,278,034
1989	271,683,149	277,990,349	20,333,030	197,805,889	59,851,430
1990	286,093,185	292,400,385	28,689,293	203,147,754	60,563,338
1991	262,289,891	268,597,091	33,421,594	194,957,172	40,218,326
1992	221,190,747	227,497,947	8,816,515	179,604,204	39,077,228
1993	271,506,987	277,814,187	22,491,562	198,931,855	56,390,771
1994	294,495,270	300,802,470	48,665,232	208,725,553	43,411,685
1995	265,701,727	272,008,927	26,305,085	200,151,982	45,551,860
1996	267,500,775	273,807,975	34,442,755	200,556,568	38,808,652
1997	171,436,594	177,743,794	17,777,491	153,447,934	6,518,369
1998	290,195,437	296,502,637	39,033,187	213,668,470	43,800,980
1999	267,614,315	273,921,515	56,881,440	195,199,366	21,840,709
2000	266,162,718	272,469,918	44,235,936	194,201,002	34,032,980
2001	207,494,900	213,802,100	29,770,330	170,926,953	13,104,818
2002	265,592,996	271,900,196	29,770,330	196,916,259	45,213,607
2003	297,294,066	303,601,266	34,267,968	209,183,914	60,149,384
2004	281,291,422	287,598,622	48,347,021	203,688,640	35,562,961
2005	250,281,782	256,588,982	27,442,368	193,473,301	35,673,313
2006	320,183,547	326,490,747	47,992,435	214,020,887	64,477,425
2007	269,278,229	275,585,429	38,893,392	199,441,305	37,250,732
2008	304,012,686	310,319,886	50,259,571	211,319,683	48,740,632
2009	231,208,468	237,515,668	34,723,123	186,495,781	16,296,764
2010	349,874,109	356,181,309	78,645,168	229,515,101	48,021,040
2011	474,681,071	480,988,271	57,300,307	239,296,196	184,391,768
2012	231,592,675	237,899,875	37,448,784	180,964,137	19,486,954
Promedios	281,893,680	288,200,880	35,995,405	200,501,323	51,704,152
Mínimo	171,436,594	177,743,794	8,816,515	153,447,934	6,518,369
Máximo	474,681,071	480,988,271	78,645,168	239,296,196	184,391,768

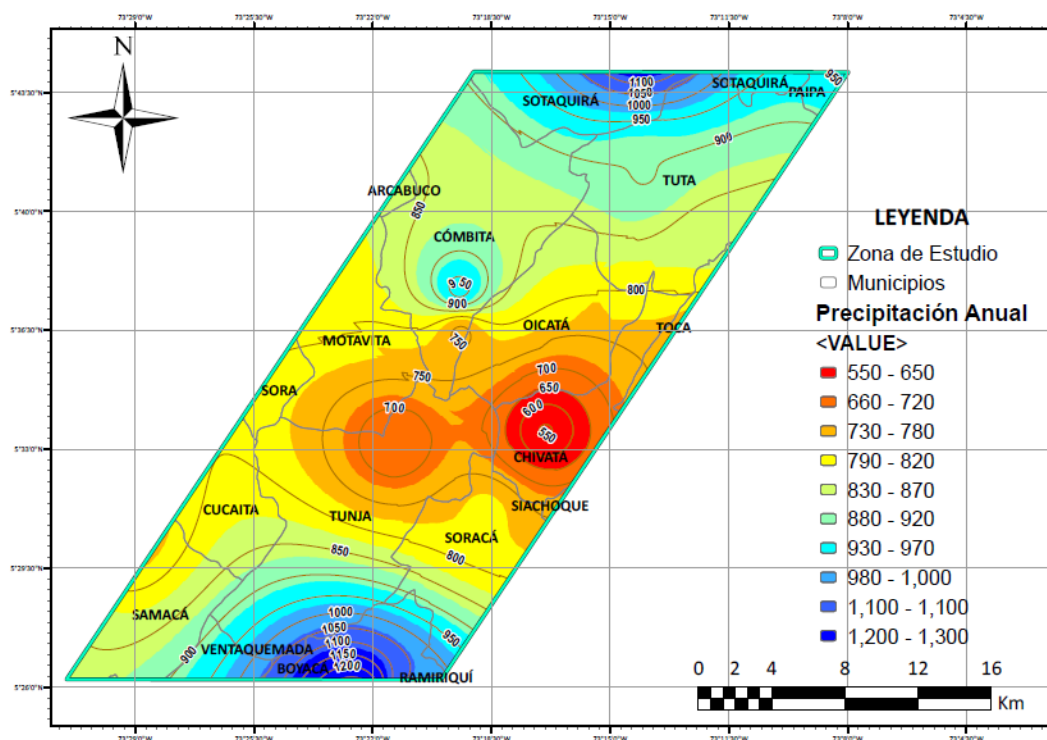
Nota. Ajustada y recalculada parcialmente: Cálculo de la Infiltración (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016a, pp. 71–72).

Precipitación. En el acuífero de Tunja se presenta precipitación anual que oscila entre 600 y 1300mm al año dependiendo el sector de la cuenca, representado en la Figura 25 según análisis realizado a 18 estaciones meteorológicas las cuales se encuentran distribuida de la zona de estudio (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016a, pp. 50–60).

“La precipitación para este caso de estudio alcanza valores totales mensuales de hasta 200 mm y en otros casos llega a cifras cercanos a cero. El valor medio de esta es de 50mm al mes” (Monroy Vargas et al., 2010, p. 92). Los periodos de mayor pluviosidad se presentan de abril a junio y de octubre y noviembre (máximos).

Figura 25

Representación gráfica de precipitación anual



Nota. La imagen denota la variabilidad de la precipitación anual de la cuenca de Tunja.

Como datos adicionales se ve que la precipitación estimada está acorde con estudios similares de la cuenca Alta del río Chicamocha, en la cual los “territorios secos presentan precipitaciones anuales que van desde 650mm hasta 800mm al año” (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2015, pp. 14–15).

La descripción grafica nos muestra la precipitación anual mínima la cual se ve acentuada alrededor del municipio de Chivata, para la capital del Departamento Tunja esta entre 730 – 820mm/anual, la parte más lluviosa se da en los municipios de Soracá, Ventaquemada, Ramiriquí, Sotaquirá.

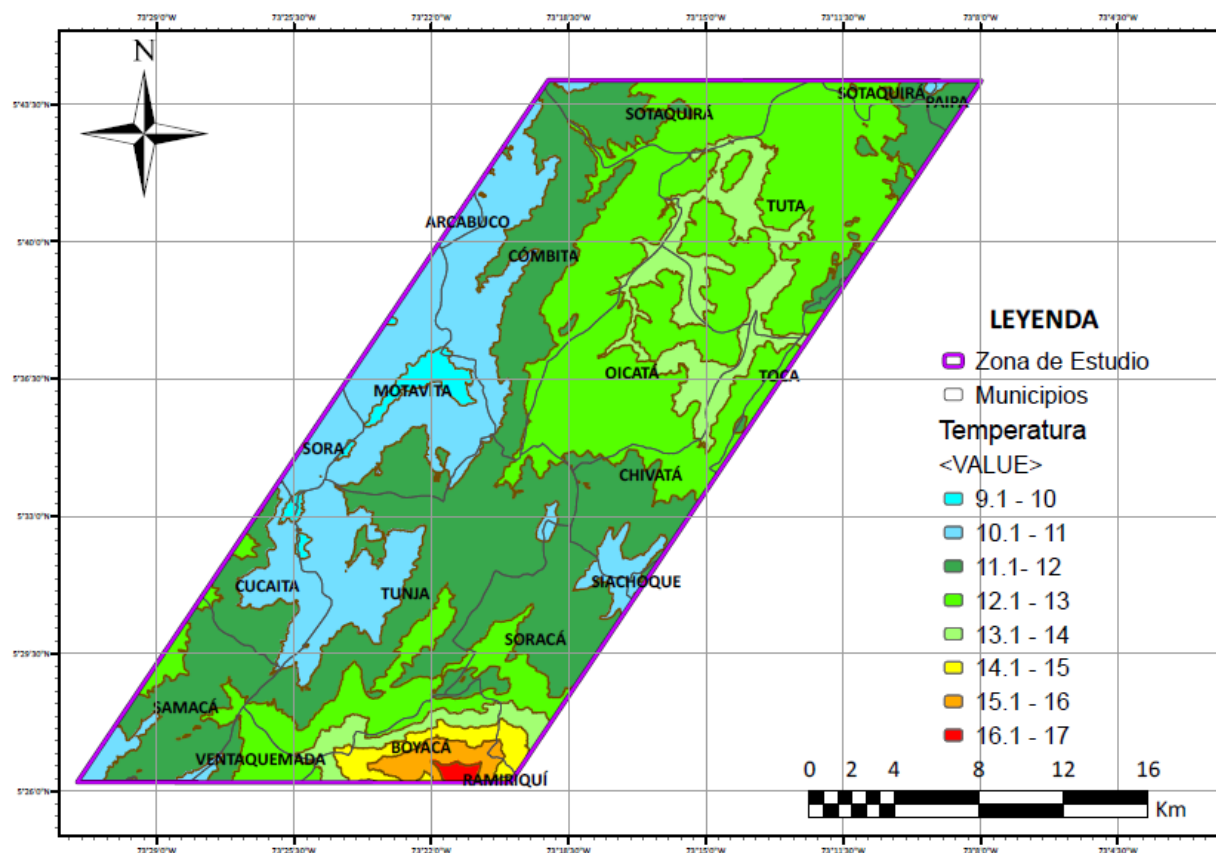
Temperatura del Aire. Monroy Vargas estimó que este parámetro oscila entre los 12 y 14 grados centígrados a lo largo del año, con amplitud térmica de 2°C (2010, p. 95).

De acuerdo con la información del IDEAM, la temperatura del punto de rocío obedece a un comportamiento bimodal con máximos en abril - mayo y octubre - noviembre que llegan a los 13.5°C, mínimos entre enero - febrero y julio – agosto que alcanzan valores de 6°C. Con base en esto, se puede establecer que las épocas más favorables para la ocurrencia de la condensación son las correspondientes a los ciclos de lluvia, obteniéndose con temperaturas relativamente altas y, en periodos secos, con poca nubosidad y enfriamiento superficial (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2015).

Con la información existente se realizó mapeo mostrado en Figura 26, de las temperaturas predominantes anuales en la zona de estudio, donde la mínima se encuentra en los municipios de Arcabuco, Motavita, Sora, Tunja y Siachoque con rango entre 9,4° a 11° y la superior oscila de 15° y 17 ° en de Boyacá Boyacá y límites con Ramiriquí.

Figura 26

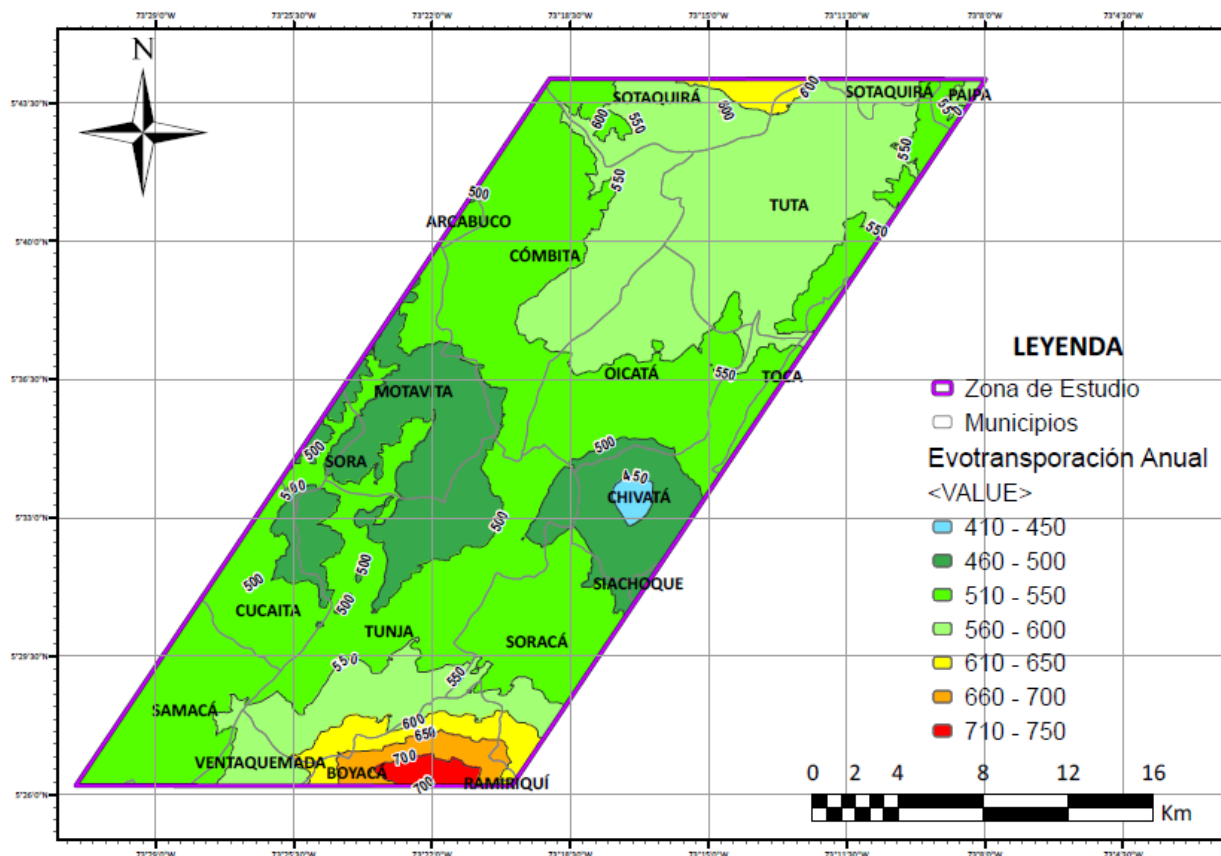
Temperatura anual



Distribución Espacial de la Evapotranspiración. Por su parte la evaporación es mayor en el periodo seco de comienzo de año, con 120mm por mes y a mediados en el mes de junio baja 80mm. El valor anual promedio es de 1.200mm, siendo esto casi equivalente al doble de la precipitación total anual (Monroy Vargas et al., 2010, p. 95).

En la zona de estudio la pérdida de humedad mostrada en la Figura 27, donde un mayor rango se presenta en Ramiriquí y siendo Chivata el municipio de menor evapotranspiración anual, destacándose que en la zona del sistema de acuífero de Tunja el promedio oscila entre 500 y 600 milímetros al año principalmente, con la modelación de los datos existentes.

Figura 27

Evapotranspiración anual

Nota. El cuadro representa la evapotranspiración de la cuenca en su rango anual.

La pérdida de humedad se ve a un mayor rango en Ramiriquí y siendo Chivata el municipio de menor evapotranspiración anual, destacándose que en el sistema de acuífero de Tunja el promedio oscila entre 500 y 600 milímetros al año principalmente.

Como referencia se verifico la ETP que se presentaron en la cuenca del río Chicamocha donde se encontraron valores de 1350mm al año y en los territorios ubicados a una cota superior fluctúa entre 1270mm a 1290mm (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2015, p. 19), donde:

La mayor ETP se presenta durante marzo y octubre, con valores que oscilan en 118mm –

126mm. En el mes de marzo se encuentran entre 103mm – 110mm. Lo anterior está relacionado

con los periodos de máximas temperaturas y aumento de agua en la superficie de la cuenca. Los meses de menor ETP comprenden julio, agosto y septiembre, cuando los niveles de temperaturas son más bajos en la cuenca (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2015, p. 20).

5.1.4 Población de la Zona de Estudio

La población con mayor influencia al sistema acuífero de estudio es la establecida en la ciudad de Tunja con 206.8 mil habitantes y otros municipios aledaños que con la proyección del DANE suman 333 mil habitantes, tal como se puede apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3

Proyección población de presente en el sistema acuífero de Tunja

Nombre Municipio	Total		
	2018	2019	2020
Tunja	199.221	202.996	206.827
Cómbita	15.174	15.350	15.533
Cucaita	4.691	4.709	4.703
Motavita	8.470	8.607	8.752
Oicatá	2.836	2.833	2.845
Paipa	31.582	31.868	32.164
Samacá	20.546	20.767	21.002
Sora	3.029	3.030	3.030
Sotaquirá	7.340	7.224	7.117
Soracá	5.167	5.109	5.057
Tuta	9.856	9.916	9.992
Ventaquemada	15.729	15.827	15.937
Total			332.959

Nota. La tabla ilustra sobre poblacionales que tiene la zona del acuífero en los diferentes municipios dada del 2018 hasta el 2020. Tomado de Proyección de DANE, 2020.

Para el caso de la capital del departamento de Boyacá, “Tunja es un reconocido y notable centro literario, científico, deportivo, universitario, cultural e histórico, es considerada Ciudad Universitaria de Colombia, debido a la gran afluencia de alumnos de otras ciudades” (Alcaldía de Tunja, 2015, p. 44), que

para el 2014 se contaba con alrededor de 15500 estudiantes de educación superior adicionales a la estadística de los residentes.

5.1.5 Formas y Áreas de Recarga del Acuífero

La precipitación que se presenta en el área del acuífero de Tunja es la principal y casi única forma que tiene el sistema de recargarse, comúnmente se conoce como recarga natural atendiendo únicamente a la acción propia de las lluvias que al contacto con el suelo realizan el proceso de infiltración a capas inferiores este se determinó alrededor de 3.5 millones de metros cúbicos anuales lo cual es inferior a la totalidad extraída.

En lo relacionado con las áreas de recarga de este acuífero, los municipios que lo conforman aportan en diferentes proporciones espacios para el desarrollo de la actividad. La formación geológica Cacho (Tic), tiene la mayor parte de su área en Tunja con un 35,6%, seguida de Tuta con un 17%, y Cómbita con 13, 5%, siendo estos los porcentajes más representativos de la zona (Corpoboyacá, 2015, p. 18).

Corpoboyacá señala que los datos más significativos en la Formación Labor y Tierna (Kg1) corresponden a los municipios de Tunja con el 18,3% de las áreas de recarga de la zona, Soracá con 13,6%, y Motavita con 13,3%. Esta formación geológica aflora en el costado oriental del Sinclinal de Tunja, como una franja continua alargada (2015, p. 18).

En la Formación Plaeners (Kg2), que aflora al oriente y occidente de la zona de estudio, Soracá tiene el porcentaje más alto de las áreas de recarga con un 14,2%, luego Boyacá con un 11,8%, y Chivatá con un 11,4% (Corpoboyacá, 2015, p. 18).

La reciente actualización respecto a las áreas de recarga se da en el año 2016 que determinó la existencia de 75.16 km², calculadas en la Tabla 4 y representadas en la Figura 28, distribuidos en Subcuenca hidrogeológica sinclinal de Tunja, Albarracín y falla de Chivata.

Tabla 4

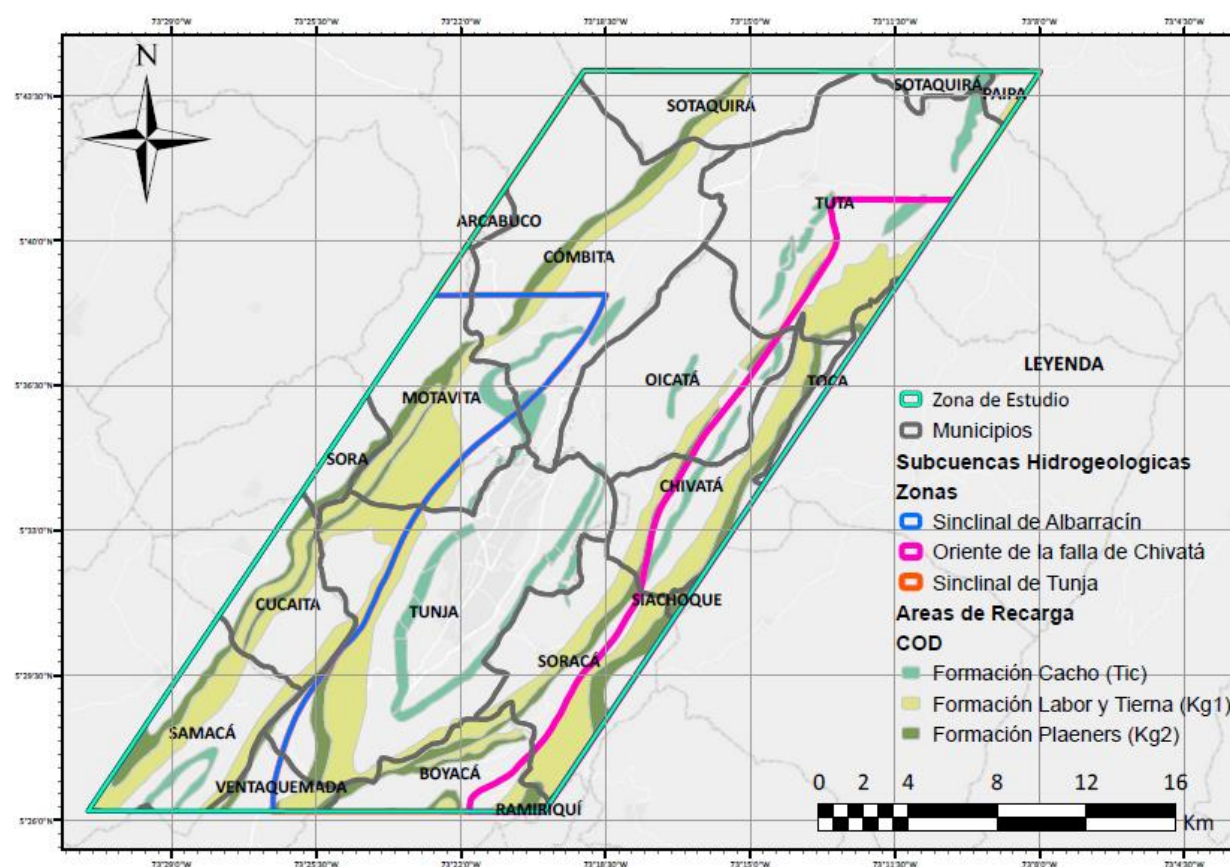
Áreas de recarga Acuífero de Tunja

Subcuenca hidrogeológica sinclinal de Tunja	Área de recarga (Km ²)
Formación Cacho (Tic)	10,15
Formación Labor y Tierna (Kg1)	19,64
Formación Plaeners (Kg2)	9,55
Subcuenca hidrogeológica sinclinal de Albarracín	
Formación Cacho (Tic)	2,12
Formación Labor y Tierna (Kg1)	22,4
Formación Plaeners (Kg2)	6,86
Subcuenca al oriente de la falla de Chivatá	
Formación Cacho (Tic)	0,48
Formación Labor y Tierna (Kg1)	3,85
Formación Plaeners (Kg2)	0,13

Nota. Datos área recarga, tomado de (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016a, p. 388)

Figura 28

Áreas de recarga acuífero de Tunja



La zona de recarga del acuífero de Tunja es de 1.49 km^2 , con un valor de la recarga de $569.832 \text{ m}^3/\text{año}$, la infiltración y recarga del acuífero correspondiente a la formación Cacho y a los niveles de areniscas de la formación Bogotá, es muy baja o bien, no existe (Monroy Vargas et al., 2010, pp. 113–124).

En el 2016 se estableció que el área de recarga como se mencionó anteriormente es de 75.16 km^2 con total de $51.704.083,52 \text{ m}^3/\text{año}$, pero en la zona donde se extrae para usuarios de la capital del departamento se encuentra la mayor cantidad por los pozos del acuífero, de la que se detalla que:

En la subcuenca hidrogeológica del sinclinal de Tunja, se infiltran $27.062.817,19 \text{ m}^3/\text{año}$, de los cuales $6.982.399,45 \text{ m}^3/\text{año}$, constituyen la recarga del acuífero superficial y $20.080.417,74$, la recarga del acuífero de mayor profundidad.

El volumen de agua que se infiltra y recarga el acuífero superficial, sería de aproximadamente $3.490.000 \text{ m}^3/\text{año}$, volumen igual en orden de magnitud al actualmente concesionado a la empresa Proactiva S.A. E.S.P., que es de: $3.458.237,36 \text{ m}^3/\text{año}$. (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016a, pp. 387–388)

Por lo antes expuesto, lo encontrado por la Usta y Corpoboyacá en el 2005, ha mejorado con el paso del tiempo y la intervención realizada por las autoridades ambientales en pro de la reorganización y cuidado del acuífero, sin embargo es claro que la recarga está cercana a la concesión otorgada y en caso de requerirse generaría un estrés al sistema.

El problema principal se encuentra en las características del balance hídrico, toda vez que la recarga natural del acuífero es de $0,57 \times 10^6 \text{ m}^3$ al año, caudal inferior a la cantidad de agua extraída que es de $1,55 \times 10^6 \text{ m}^3$ anual. Por tanto, el índice de escasez calculado con base en el caudal captado y el explotado, es muy alto (2,7) y plantea la necesidad de reordenar la demanda y la oferta para prevenir futuras crisis (Monroy Vargas et al., 2010, pp. 133–138).

5.1.6 Numero de Pozos y Caudal Extraído

El agua subterránea que se extrae del sinclinal de Tunja corresponde a 20 pozos poco profundos, de los cuales 15 están a cargo de la empresa prestadora de servicio de agua potable Veolia (antes Proactiva Aguas de Tunja S.A. E.S.P), utilizados dependiendo de la disponibilidad del recurso.

El caudal concesionado es de 109.66 litros por segundo ($0.11 \text{ metros}^3/\text{segundo}$), y particulares tienen otorgado 2.8 litros por segundo ($0.0028 \text{ metros}^3/\text{segundo}$) (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016a, p. 143). Además, señala que el comportamiento de la extracción realizada en los pozos concesionados para el periodo 2005 a 2015 detallado en Tabla 5 con un promedio de $1.374.160,69 \text{ metros}^3/\text{año}$, que corresponde al 39.5% de la concesión (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016a, pp. 143–159).

Tabla 5

Extracción de agua en pozos de la ciudad de Tunja 2005 a 2015

Año	Extracción Realizada (m^3/s)	Extracción Realizada ($\text{m}^3/\text{año}$)	Caudal sin uso ($\text{m}^3/\text{año}$)	% Utilizado
2005	0,048	1.514.732,45	1.956.529,42	43,64%
2006	0,047	1.483.175,53	1.988.086,34	42,73%
2007	0,035	1.104.492,41	2.366.769,46	31,82%
2008	0,067	2.114.314,05	1.356.947,82	60,91%
2009	0,044	1.388.504,75	2.082.757,12	40,00%
2010	0,051	1.609.403,23	1.861.858,64	46,36%
2011	0,014	441.796,97	3.029.464,90	12,73%
2012	0,02	631.138,52	2.840.123,35	18,18%
2013	0,046	1.451.618,60	2.019.643,27	41,82%
2014	0,075	2.366.769,46	1.104.492,41	68,18%
2015	0,048	1.514.732,45	1.956.529,42	43,64%

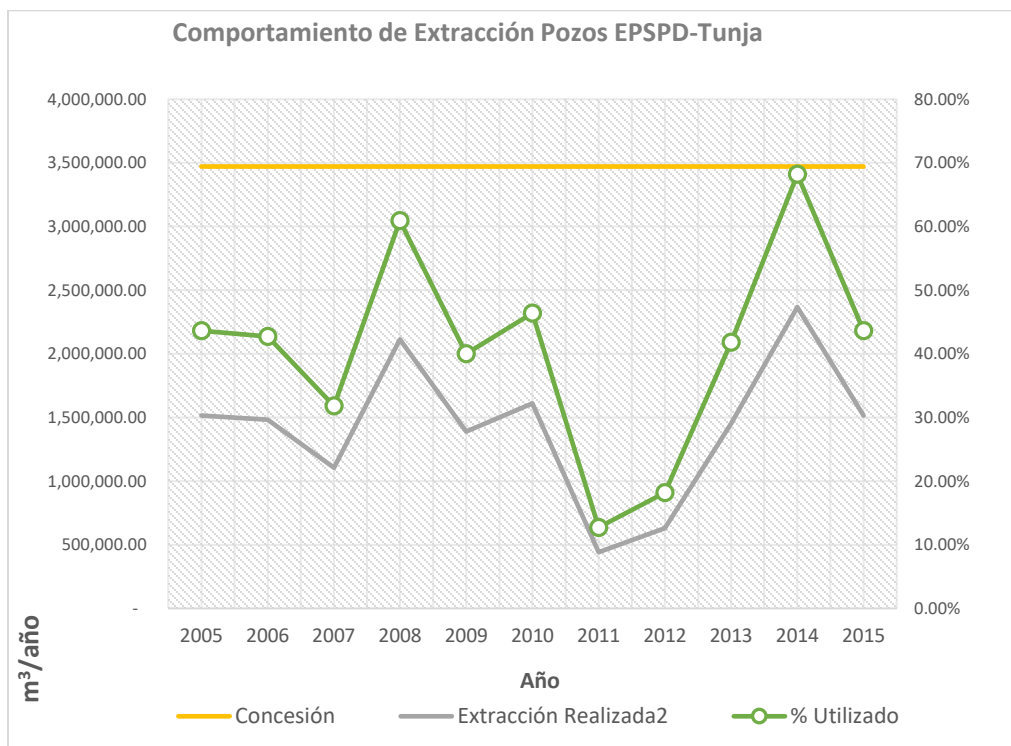
Nota. La tabla muestra el porcentaje de medición en la extracción del agua en los pozos de la zona acuífera de Tunja desde el año 2005 al 2015. Fuente: Corpoboyacá

Se evidencia que las mayores extracciones de agua se realizaron en los años 2008, 2010, 2013, 2014 y 2015, y para 2011 y 2012 fueron los que menos utilizaron el caudal concesionado tal como se

muestra en la Figura 29, periodos de fenómenos naturales adversos con invierno constante. El máximo porcentaje utilizado llegó al 68.18% en el año 2014 y el mínimo en el 2011 con el 12.73%.

Figura 29

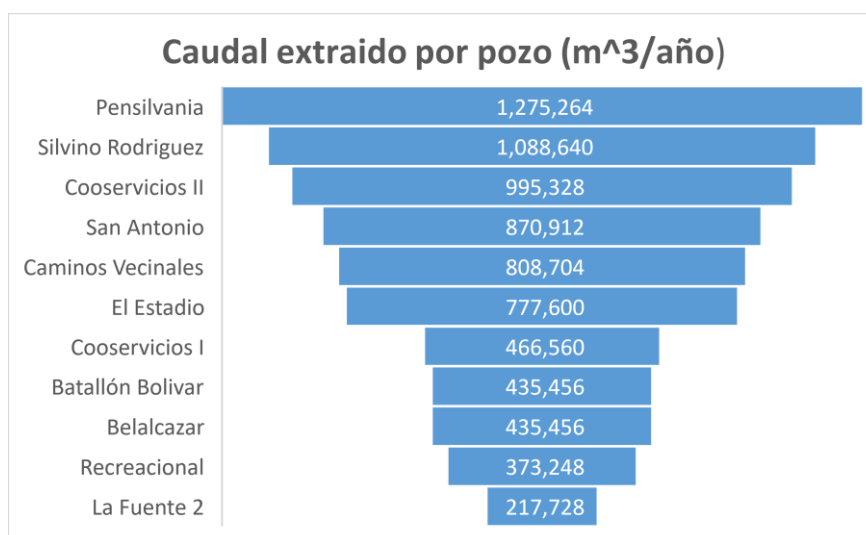
Comportamiento de Extracción ESPD-Tunja



Por otra parte autores como Monroy Vargas et al, calcularon para el periodo 2003-2005 un caudal extraído de los pozos ubicados en la ciudad de Tunja y concesionados a la empresa prestadora de servicios de 7.744.896m³/año (2010, p. 99).

Con la información anterior se puede concluir que hasta el 2015 el caudal explorado era extremadamente superior comparado con la década 2005 a 2015, lo cual también explicaría que a mediados del 2010 los autores hablan de sobre explotación del acuífero y después del 2015 las condiciones cambiaron con capacidad de almacenamiento del mismo.

Para tener un orden de magnitud en la Figura 30 se parecía el caudal extraído por pozo, de mayor a menor según corresponda de los concesionados en la ciudad de Tunja.

Figura 30*Caudal extraído por pozos en la ciudad de Tunja*

Nota. Adaptado de (Monroy Vargas et al., 2010, p. 100) Capacidad de explotación de los pozos.

Del estudio realizado en el 2016 en conjunto de Corpoboyacá y el Consorcio Hidroboyacá se encontró que en la formación Labor y Tierra se encuentran dos pozos de los que se extraen $163.987\text{m}^3/\text{año}$, y de su superficie se extraen $348.472\text{m}^3/\text{año}$ de 25 manantiales.

Así mismo, el sinclinal de Albarracín del acuífero superficial en el municipio de Combita se encuentra un pozo profundo con un caudal concesionado de $1734,48\text{m}^3/\text{año}$; a mayor profundidad Formación Labor y Tierra y Formación Plaeners, 4 pozos con concesión de $146.957,76\text{m}^3/\text{año}$ (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016a, p. 160); manantiales con $145.380.96\text{m}^3/\text{año}$; en la falla de Chivata un pozo con $25.228,8\text{m}^3/\text{año}$ de concesión y 8 manantiales $441.8\text{m}^3/\text{año}$.

5.1.7 Aportaciones Adicionales de Caudal para el Abastecimiento

Para el abastecimiento de la población en el área del sistema del acuífero de Tunja se utiliza la extraída por medio de pozos profundos y agua superficial proveniente de embalse, ríos y quebradas presentes en la zona.

La ciudad de Tunja se abastece adicionalmente a las aguas subterráneas de un embalse denominado Teatinos lugar de nacimiento del río que lleva su mismo nombre y en su desembocadura se conoce como Garagoa, con una concesión establecida de 0.280 metros cúbicos por segundo (280 l/s).

En la literatura estudiada se detalla un caudal de trasvase (embalse Teatinos a la ciudad de Tunja) controlado en el ingreso a la planta de tratamiento de agua potable PTAP ubicada en el barrio Libertador y la salida con mediciones en río La Vega de alrededor de $0.20\text{m}^3/\text{s}$ ($6.307.200\text{m}^3/\text{año}$), la diferencia con lo concesionado se considera como pérdidas del sistema.

5.1.8 Fuentes de Contaminación

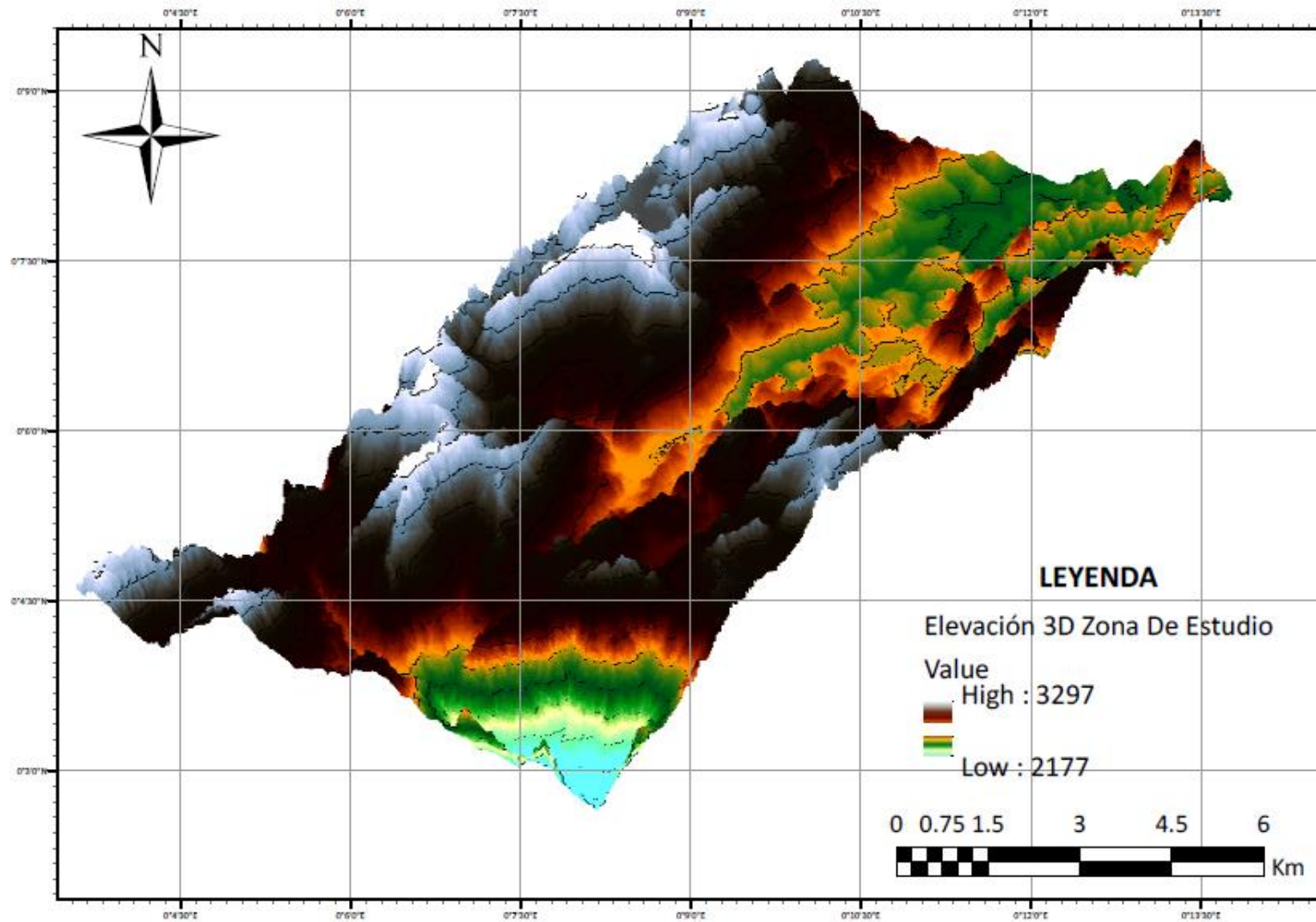
En el área urbana, las principales fuentes de contaminación están relacionadas con estaciones de servicio (suministro de derivados del petróleo), rellenos sanitarios, conductos y sistemas de drenaje, entre otros (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016b, p. 9).

Con base en los proyectos de ley que se han creado para que los contaminantes disminuyan considerablemente en el área urbana y rural. Ya que según estudios realizados durante los últimos años se ha podido demostrar la ayuda ambiental que genera tener en cuenta estos y darles un tratamiento preciso para disminuir el daño que causan.

En el área rural, también se podrían presentar riesgos de contaminación, por actividades agropecuarias (como consecuencia del posible uso de pesticidas y fertilizantes), particularmente en los sitios en donde aflora el acuífero profundo, los cuales integran las zonas de recarga de los acuíferos (Corpoboyacá & Hidroboyacá, 2016b, p. 10).

5.1.9 Modelo de Elevación Digital

Para la delimitación de la cuenca se utilizó la guía de elevación digital (DEM), obtenido partiendo de las planchas cartográficas suministradas por el IGAC y la información provista por Corpoboyacá respecto al sistema acuífero de Tunja, la cual fue cargada en el software ArcGIS, con ello realizar una serie de procedimientos para poder llegar a este modelo mostrado en la Figura 31.

Figura 31*Modelo de elevación digital*

Nota. La representación gráfica nos muestra la elevación digital de la cuenca, práctica realizada en ArcGIS.

5.1.10 Problemática y Amenazas de Agua Subterránea en Zonas de Alta Montaña

El acuífero de la ciudad de Tunja ha sido estudiado en las últimas décadas por diferentes entidades, entre ellas la Corporación Autónoma Regional Corpoboyacá, el Municipio y la academia, a raíz que fue utilizado como abastecimiento de agua para el consumo humano, posterior a escases que trajo consigo un receso económico y estancamiento del desarrollo en los años 90.

Pese a la problemática sentida por la carencia de líquido potable especialmente en la ciudad, desde décadas atrás, se había explorado y determinado la posibilidad de explotar las aguas subterráneas, como es el caso del Geólogo Gilberto Manjarrez F, que en la década del 65 concluyó entre otros que “en la región de Tunja es posible conseguir agua subterránea en cantidad suficiente para atender la demanda doméstica en aquellas áreas septentrionales bajas, cuyo subsuelo está formado por areniscas del Cacho” (Manjarrez F, 1965, p. 7), refiriéndose con ello a la formación geográfica denominada Cacho.

La ciudad cuenta con el abastecimiento del recurso hídrico de la fuente subterránea, el cual se conforma por la subcuenca hidrogeológica del sinclinal de Tunja en el centro del sistema, la del anticlinal de Albarracín al occidente y la del anticlinal al oriente de la falla de Chivata (González Pérez & Medina Sandoval, 2017, p. 6).

Como cualquier sistema acuífero se determinan las posibles amenazas que puedan afectar la calidad del agua subterránea a mediano y largo plazo, que para el caso algunas de ellas se plasmaron en un documento guía a la comunidad por parte de la Corpoboyacá (2015, pp. 20–21) y se relacionan con,

- La disminución en los niveles del acuífero las cuales se puedan presentar en el futuro a causa de la sobreexplotación del mismo.
- Las fuentes de agua que estén conectadas de forma directa con formaciones geológicas que puedan presentar contaminantes que dañen el sistema.
- La contaminación por parte del uso agroquímico en los cultivos del sector.

- En las zonas de recarga la cuales tienen la mayor vulnerabilidad del sistema de las formaciones acuíferas por ser las que se encuentran en la superficie terrestre.
- Inadecuado manejo de las basuras “RCD” y la infiltración al sistema del acuífero que generan los lixiviados.
- Pozos sépticos los cuales se encuentren en contacto directo entre los residuos y las formaciones superficiales del acuífero.
- Conductos de sistemas de alcantarillados “aguas negras” las cuales puedan tener un escape logrando infiltrar el suelo contaminando los flujos de agua subterráneos.
- A causa de los vertimientos los cuales van dirigidos a las cauces y a los suelos.
- Residuos líquidos que se generan en los cementerios por parte de la descomposición de los cuerpos presentes.

5.1.11 Datos Ciclo Hidrológico Básico

Con la información recopilada, analizada y calculada en el presente capítulo se resume lo relevante del ciclo hidrológico del acuífero Sistema Acuífero Tunja en la

Tabla 6, ingresado con posterioridad en la metodología propuesta, cabe señalar que los datos no encontrados se establecieron con la experiencia de expertos.

Tabla 6

Resumen de Datos estratégicos del Sistema Acuífero Tunja

Ítem	Cantidad	Desde	Hasta	*Unidad	Fuente
Área de estudio	630			km ²	Corpoboyacá 2015
Área de estudio	630			km ²	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2016
Área de la cuenca	373,87			km ²	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2016
Área de recarga	1,49			km ²	Monroy Vargas 2010
Arte de Recarga	75,16			km ²	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2016

Ítem	Cantidad	Desde	Hasta	*Unidad	Fuente
Precipitación		600	1.300,00	mm/año	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2016
Precipitación		730	820	mm/año	Análisis tesis 2021
Precipitación		650	800	mm/año	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Precipitación		600		mm/año	Monroy Vargas 2010
Temperatura		6	13,5	grados	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Temperatura		12	14	grados	Monroy Vargas 2010
Temperatura		9,4	17	grados	Análisis tesis
Temperatura		9,5	17	grados	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Evapotranspiración	1.200,00			mm/año	Monroy Vargas 2010
Evapotranspiración		500	600	mm/año	Análisis tesis 2021
Evapotranspiración		433	586	mm/año	(Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Evapotranspiración		1.270,00	1.290,00	mm/año	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Evapotranspiración	200.501.323,00			m³/año	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Población central seca Tunja, Combita, Cucaita, Motavita y Tunja	250.000,00			Habitantes	DANE 2020
Infiltración	51.704.152,00			m³/año	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Infiltración	3.490.000,00			m³/año	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Escorrentía superficial	35.995.405,00			m³/año	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Otras fuentes (Teatinos)	0,28			m³/s	Veolia 2018
Perdidas en el sistema de tratamiento	6.307.200,00			m³/año	Veolia 2018
Recarga	570.000,00			m³/año	USTA y Corpoboyacá 2005
Recarga	27.062.817,19			m³/año	
Recarga	3.500.000,00			m³/s	Corpoboyacá 2015
Recarga	569.832,00			m³/año	Monroy Vargas 2010
Caudal concesionado a Veolia	3.471.261,87			m³/año	Resolución
Agua extraída	1.550.000,00			m³/anual	USTA y Corpoboyacá 2005

Ítem	Cantidad	Desde	Hasta	*Unidad	Fuente
Trasvase	280			l/s	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Trasvase promedio con pérdidas	200			l/s	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2015
Caudal Permitido de extracción	109,66			l/s	Proactiva Aguas de Tunja S.A. E.S.P 2012
Otras concesiones para extracción	2,8			l/s	Otros
Extracción pozos Tunja	1.374.160,69			m ³ /año	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2016
Extracción pozos Tunja	7.744.896,00			m ³ /año	(Monroy Vargas 2010)
Extracción pozos Tunja	2,8			l/s	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2016
Extracción pozo en Combita	1.734,48			m ³ /año	Corpoboyacá & Hidroboyacá 2016

Nota. * La unidad de medida se registra como se encontró en la literatura y estudios revisados

5.2 Acuífero de San Andrés

El segundo caso de estudio es la isla de San Andrés (capital del Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina), donde el acuífero representa más del 85% de la disponibilidad de agua para consumo humano, afectada por el cambio climático, toda vez que la recarga natural ha sufrido serias alteraciones, permitiendo fenómenos como, contaminación de aguas subterráneas, erosión, escases del recurso especialmente en épocas secas.

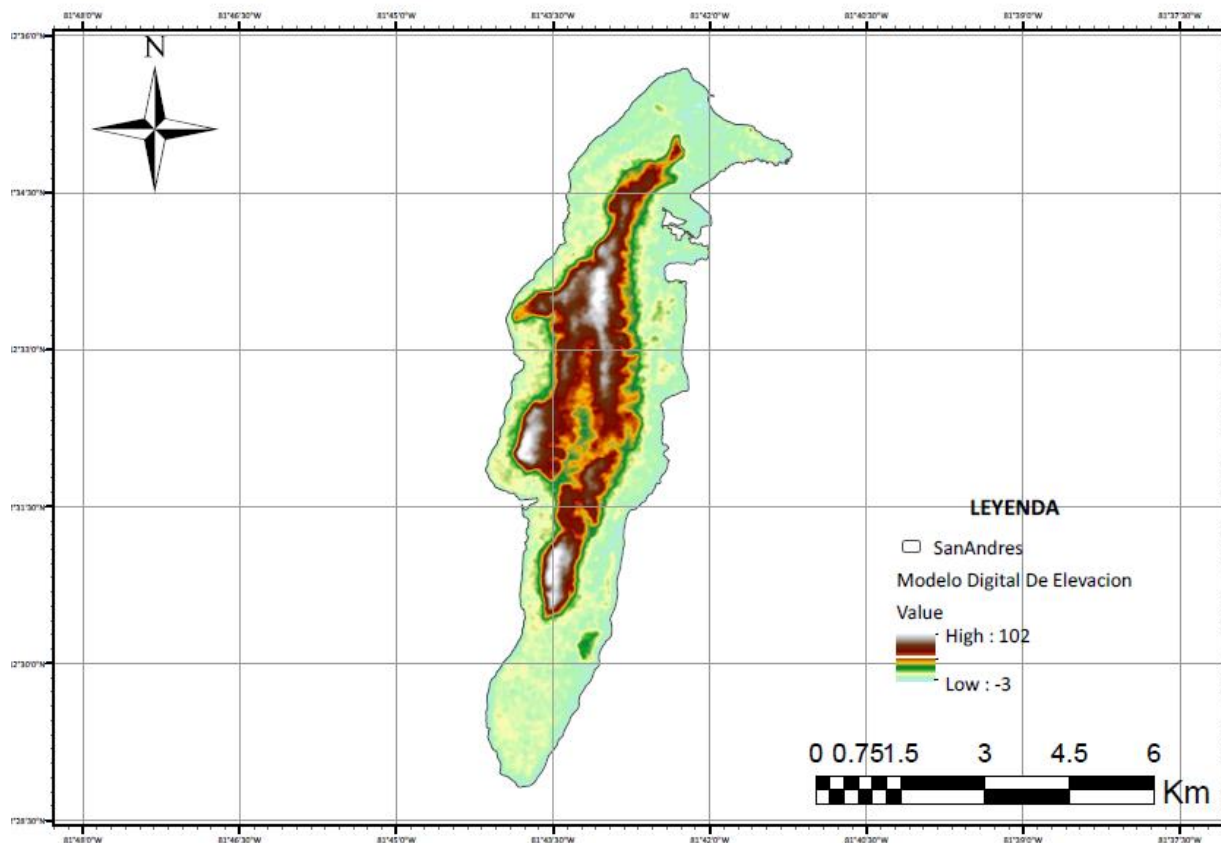
El Archipiélago está situado en Mar Caribe a unos 240 kilómetros de la costa Centroamericana, sobre el Mar de las Antillas; lo conforma tres islas principales: San Andrés, Providencia y Santa Catalina, y una gran cantidad de cayos, islotes y bajos (Coralina, 2005), cuyo modelo de elevación digital se muestra en la Figura 32 y corte geológico en la Figura 33.

En la isla, nativos y residentes dependían de las precipitaciones y la recarga de acuíferos para cubrir sus necesidades, captando y almacenando la lluvia en cisternas (tanque generalmente en concreto reforzado o mampostería) y extracción manual de aljibes. Sin embargo, el incremento de la población hizo insuficiente el abastecimiento tradicional, y esta situación promovió la construcción

masiva de pozos, especialmente de tipo barreno, para la explotación intensiva del acuífero (Guerrero Jiménez, 2019), siendo primordial para el suministro de agua potable, ayudada de plantas desalinizadoras para brindar el servicio a los habitantes y turistas.

Figura 32

Modelo Alturas en Planta San Andrés Isla



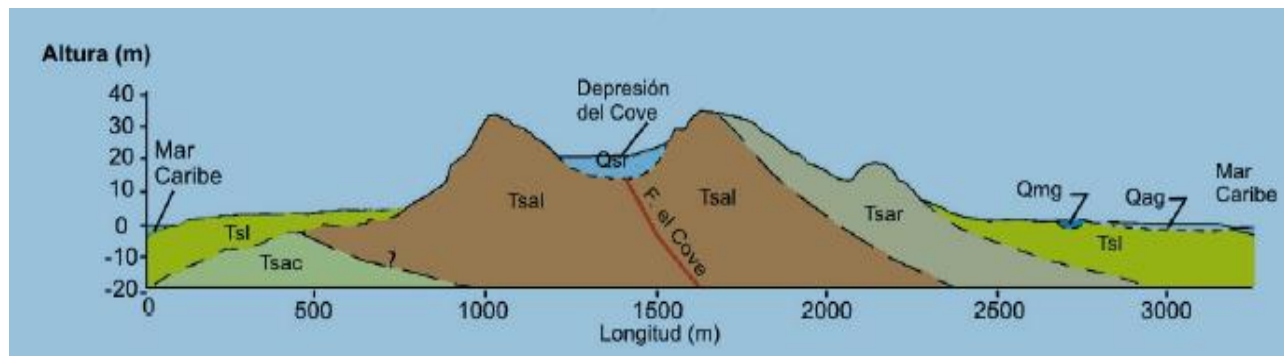
Nota. se evidencia la forma de la isla y las alturas sobre el nivel del mar son menores a los 102 metros.

La disponibilidad del líquido potable en la isla es proveniente principalmente de la precipitación que por infiltración va a los acuíferos, de su conservación y sostenibilidad depende todas las actividades, motivo por el cual todo cambio climático, variación de ciclos de lluvia e intensidad, así como los periodos secos prolongados, repercuten directamente en la existencia del recurso hídrico vital y por ende en la población, se hace necesario su preservación, aprovechamiento, uso sustentable, y la toma de medidas

urgentes que busquen mitigar su contaminación por aguas residuales e intrusión marina (Coralina, 2005).

Figura 33

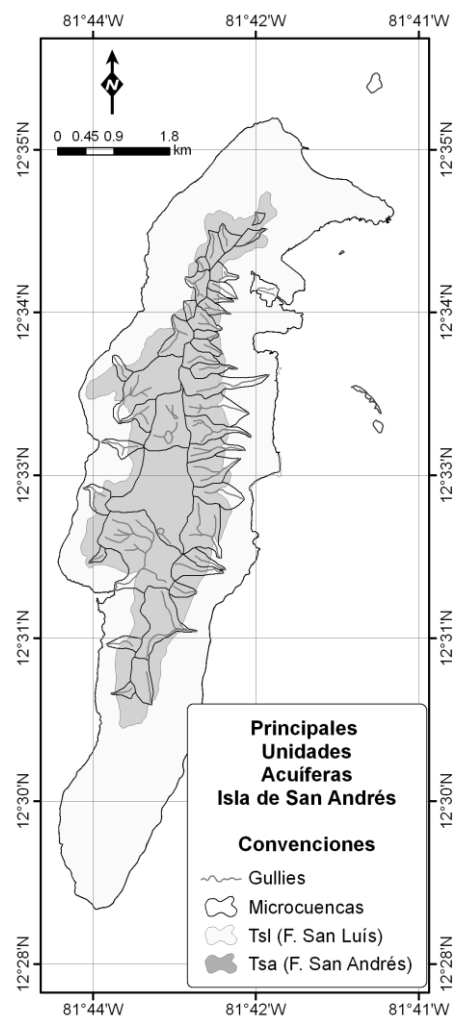
Acuífero Isla de San Andrés



Nota. Sección de la Isla San Andrés su composición y estructura. Adaptado de ilustración (Vargas-Cuervo, 2004, p. 79).

En la isla “se encuentran dos unidades hidrogeológicas, los acuíferos denominados San Andrés y San Luis, estos están intercomunicados hidráulicamente” (Minambiente & Coralina, 2013, p. 7), como fuente de agua potable en los cuales se destaca el localizado en la depresión del Cove (Vargas-Cuervo, 2004, p. 74).

Las dos unidades hidroestratigráficas vistas en la Figura 34 son acuíferos libres, denominadas Acuífero San Andrés (Tsa) con área superficial de 17.13km², alturas entre los 4 y 85msnm y Acuífero San Luis (Tsl) con área en superficie de 9.89 km², altura de 0 a 44msnm (Bedoya & Carmona, 2010, p. 3).

Figura 34*Principales unidades acuíferas de la Isla*

Nota. La ilustración demuestra la ubicación de los acuíferos en la Isla de San Andrés. Tomado de (Bedoya & Carmona, 2010, p. 3).

5.2.1 Representación del Acuífero en el Área

En la isla se encuentran principalmente 5 manantiales superficiales distribuidos en 2.700 ha, representados como arroyos, charcas o pond (cuerpo de agua estancados <8 ha, ejemplo Big Pond), humedales artificiales por excavaciones (Cocoplum y Duppy Gully) y planos inundables (Magic Garden). Se podría considerar un humedal interior al acuífero que representa el 94 % del área total emergida

(Coralina & Invemar, 2012). Adicionalmente existen 32 pozos, 6002 aljibes e infinidad de barrenos instalados en las viviendas para la extracción de aguas subterráneas.

5.2.2 Características Geomorfológicas

Referente a la geomorfología de la isla de San Andrés, en Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca El Cove (Coralina, 2005, pp. 6–10) describe sus características.

La isla de San Andrés es presumiblemente de origen volcánico, como la gran mayoría de islas oceánicas del mundo, pero en la actualidad, las rocas emergidas son principalmente de tipo bioquímico, formadas de manera predominante por carbonato de calcio (calcita); su origen está relacionado con la actividad de antiguos corales con sedimentos asociados a ellos.

Las rocas de la Isla se dividen en dos formaciones geológicas de acuerdo con su edad (Formación San Andrés y Formación San Luis). Cada formación geológica conforma un acuífero o reservorio de agua distinto, aunque las observaciones de campo indican que estas dos formaciones están conectadas hidráulicamente.

Formación San Luis:

Estas rocas pudieron haberse formado entre cinco y menos de un millón de años; conforma los terrenos topográficamente más bajos, colinda con la actual línea de costa, y está constituida por calizas coralinas arrecifales muy ricas en fósiles.

Formación San Andrés:

Corresponde a las rocas más antiguas de la isla, con aproximadamente veinte millones de años de antigüedad; se ubica en la parte central del territorio insular conforma el sistema de colinas de la isla, representa tanto un 57% del área total emergida. Las principales reservas de agua dulce se hallan en esta formación, principalmente bajo la Cuenca El Cove.

Las rocas de la Formación San Andrés, a la cual pertenecen las calizas presentes en la Cuenca El Cove, se caracterizan por presentar fracturas moderadas a intensas y porosidad secundaria alta

por disolución de carbonatos (como cavernas), permitiendo a los contaminantes moverse con altas velocidades hacia los niveles freáticos. Lo anterior disminuye la posibilidad de que las rocas actúen como filtros naturales.

En 1997, INGEOMINAS realizó el mapa de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos en la isla, y según éste, el acuífero de la Formación San Andrés presenta una vulnerabilidad alta, lo cual significa que es sensible a la mayoría de contaminantes excepto los muy absorbibles o transformables.

La forma alargada de la isla de San Andrés, guarda estrecha relación con la configuración de la Cuenca y la formación del lente de agua dulce existente. En islas de forma alargada, los sectores más anchos tienen posibilidad de desarrollar lentes de agua dulce con alta capacidad de explotación; por eso en la Cuenca El Cove se encuentran las mayores reservas de esta agua dulce y de allí que los pozos del acueducto se hayan perforado en ese lugar, pues es la zona más ancha de la isla.

La Cuenca posee en su interior, un valle y su principal drenaje es el arroyo El Cove que desemboca en el mar, el cual, como todos los drenajes de la isla, es intermitente. El arroyo del Cove es el más importante de la isla y en épocas prolongadas de lluvias puede presentar escorrentía con caudales mayores a un metro cúbico por segundo.

La Isla ha sido definida geológicamente por varios autores en dos unidades calcáreas, una de calizas heterogéneas, denominada Formación San Andrés de edad Mioceno que aflora en la parte central del territorio y representa la zona de colinas suaves con alturas máximas de 87 y otra de calizas coralinas del Pleistoceno, conocida como Formación San Luis, que constituye la región plana a suavemente inclinada de la plataforma arrecifal emergida (Vargas-Cuervo, 2004, p. 73).

5.2.3 Climatología (Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración)

En la mayoría de los escenarios de cambio climático, los recursos hídricos de las islas pequeñas correrían probablemente un serio peligro, estas disponen de un abastecimiento hídrico limitado, y en ellas los recursos hídricos son especialmente vulnerables a los cambios futuros y a la distribución de la precipitación. En este escenario muchos territorios del Caribe experimentarían un mayor estrés hídrico por efecto del cambio climático. Las proyecciones contemplan una disminución de las lluvias, por lo que es improbable que pueda cubrirse la demanda durante los periodos con escasas de lluvia (Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, 2008, p. 141).

Precipitación. En la isla tiene un promedio de 1894mm por año. Con un período lluvioso en los meses de mayo a diciembre donde se presentan los más altos registros con 91% y el 89% y el periodo seco de enero a abril, con promedios que varíen entre 22.5mm y 24.9mm (Coralina, 2005, p. 28).

Otros autores calcularon la precipitación media anual sobre el archipiélago de 1850mm. La distribución mensual es monomodal; se caracteriza por un período de lluvias bajas en los primeros cuatro meses del año donde se registra el 8% del total, y uno de precipitaciones altas, de junio a noviembre con el 75% (Vargas-Cuervo, 2004, p. 74).

En el mismo sentido el territorio insular tiene un ciclo unimodal de lluvia, presentándose excesos de junio a noviembre y déficit entre diciembre y mayo (Carmona, Poveda, Vélez, Bedoya, & Vélez, 2010, p. 4), por ello la cuantificación de precipitación en la isla acorde a lo enunciado por Bedoya y Carmona quienes establecieron promedio anual de 1900mm (2010, p. 2).

Como aspecto relevante, en la isla se recolecta el agua de lluvia de los techos a tanques para usos diversos diferentes al consumo, este tipo de proyectos es apoyado por las entidades con recursos y obras, pero el volumen recolectado insuficiente, con problemas de contaminación y complicado en época de verano, en el Plan de Ordenamiento de la cuenca se estima que cubre al 18% de la población.

En cuanto a la esorrentía superficial, en la Isla no hay corrientes superficiales permanentes. En periodos de altas precipitaciones se forman algunos cauces, los caudales de escurridos son altos durante el período lluvioso y secos en verano (Vargas-Cuervo, 2004, p. 74).

Temperatura. En cuanto a la temperatura media anual varía de 27.5°C en la costa y 26.5°C en la zona colinada con una media mensual uniforme durante el año y extremos absolutos que oscilan entre 17°C y 35°C (Vargas-Cuervo, 2004, p. 74).

Es de considerar el alcance que tienen cada uno de estos valores, porque dependiendo su resultado es posible estimar en qué temporada climática se encuentra la isla y la cantidad y calidad de la infiltración de agua que llega al acuífero.

La humedad relativa media anual es del 81%; los registros medios mensuales varían de 78% y 84% a lo largo del año. Los valores más bajos se observan de enero a abril y los mayores entre junio y octubre (Vargas-Cuervo, 2004, p. 74). Componente ajustado a características propias de zonas tropicales por la ubicación geográfica en la que se encuentran las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Distribución Espacial de la Evapotranspiración. La evapotranspiración potencial media anual en la isla es de 1740mm; los valores medios mensuales varían entre un máximo de 177mm en Marzo y un mínimo de 116mm en Octubre (Vargas-Cuervo, 2004, p. 74). El resultado básico para el suministro de agua en el territorio, por la necesidad de infiltración, dado que con el aumento de la evapotranspiración se tiene complicaciones con el abastecimiento del vital líquido.

En la isla en promedio hay 2650 horas de brillo solar en el año, lo que representa una insolación media anual del 61% (Vargas-Cuervo, 2004, p. 74).

5.2.4 Población de la Zona de Estudio

Las proyecciones del DANE a 2020 se calculan 75 mil habitantes, sin embargo, la isla se caracteriza por tener personas en situación de irregularidad que incrementan dicha cifra en 15 mil (no oficial), más un aproximado de 40 mil como ingreso normal de turistas.

La población flotante crece desmesuradamente por causa de la actividad turística. Según estudios realizados por entes de control, circulación y residencia, se estima que se acercara a los 40 mil habitantes, por tal motivo el gobierno se encargó de expedir decretos y normas las cuales se impiden que el territorio se convirtiera en su lugar de residencia y así mismo poder cuidar los residentes nativos llamados raizales.

El incremento de la población flotante afecta directamente a las reservas de agua que posee el acuífero de la isla teniendo en cuenta que el suministro es limitado y su alcance se limita a un número específico de habitantes. La actividad turística incrementa notablemente el consumo de agua potable y así mismo el acuífero no cumpliría la demanda total que representaría este incremento de población (“San Andrés controla su población - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com”, s/f).

5.2.5 Zonas y Áreas de Recarga del Acuífero

La recarga se estimó en 810mm/año para fase fría, 480mm/año para un año normal y de 255 para una cálida, utilizando características y usos del suelo en la isla (Bedoya & Carmona, 2010, p. 6). Estos rangos son establecidos teniendo en cuenta la capacidad que posee el acuífero para almacenar el agua necesaria para la extracción del suministro potable de la zona.

Esta recarga se representa principalmente por el agua lluvia teniendo en cuenta la infiltración que posee el suelo (480mm/año), con valor cercano a los 60 litros/segundo. Analizando los estudios realizados por los entes de control se establece que el caudal seguro de explotación de la Cuenca El Cove es sólo de 40 litros/segundos (Coralina, 2005, p. 29).

El acuífero comienza a recargarse en el mes de junio alcanzando los máximos niveles en diciembre, posteriormente comienzan a disminuir a partir de enero hasta mayo (Bedoya & Carmona, 2010, p. 14). La Cuenca El Cove observándola de manera hídrica, ésta es el sector más significativo de la isla por contener la mayoría reserva de agua dulce subterránea además de ser la zona de mayor recarga.

5.2.6 Recarga Gestionada o Artificial en la Isla de San Andrés

En la isla en el año 2013 se priorizo un proyecto de recarga gestionada del acuífero ante los múltiples inconvenientes de acceso al agua potable, con ello las diferentes entidades propusieron y construyeron un sistema que busca aumentar la disponibilidad del recurso hídrico a habitantes y turistas, aprovechando de mejor forma las precipitaciones.

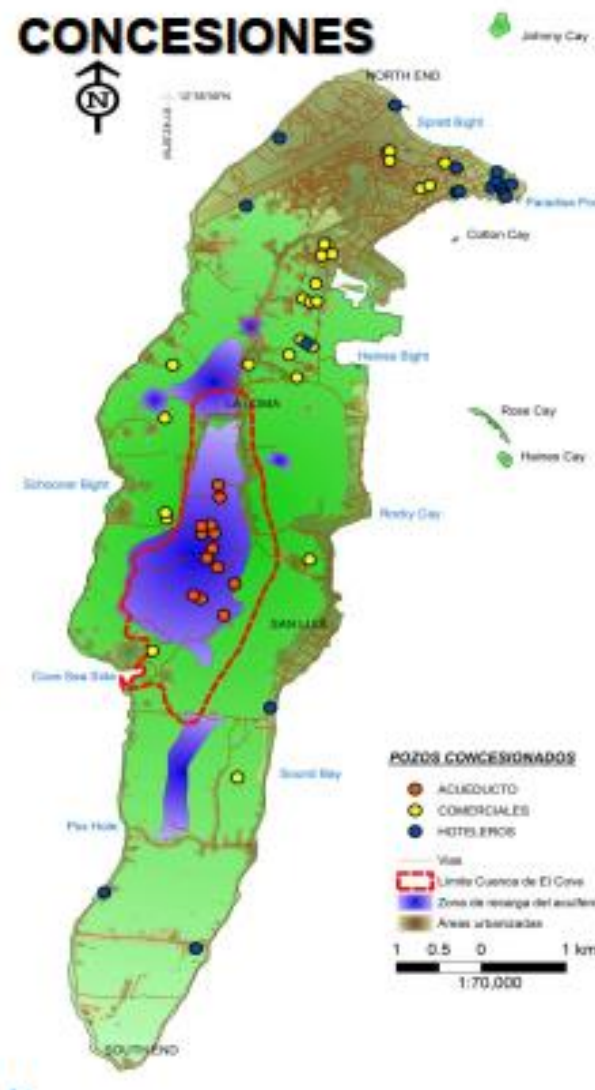
Son sistemas de trincheras de infiltración los cuales están compuestos por diques en forma de U, que la rodean cumpliendo la función de contener la precipitación que pasa por escorrentía. Estas estructuras poseen 2 cámaras, como material de primer filtrado se le agrega gravilla. Luego mediante conductos perforados se produce el ingreso de agua al suelo.

Cuenta con diques disipadores de energía por los canales de escorrentía para que el flujo no vaya a causar daños en la estructura para tener mejores resultados en el proceso de decantación (Minambiente & Coralina, 2013, pp. 49–50), una proyección de la recarga gestionada en dos puntos de la isla tienen un caudal de $0.09\text{m}^3/\text{s}$ y $0.076\text{m}^3/\text{s}$, en los meses de más alta precipitación en un periodo de retorno de dos años. Para los análisis propuestos en este estudio se considera 7 meses por año, para el periodo de mayo a diciembre.

5.2.7 Numero de Pozos y Caudal Extraído

Entre los pozos concesionados por Coralina existe una explotación promedio de $2.685.650\text{m}^3/\text{año}$ el cual equivale al 38.42% del caudal autorizado de aprovechamiento. Este consumo está distribuido en $1.960.304\text{m}^3/\text{año}$ para el acuífero San Luis y $725.348\text{m}^3/\text{año}$ en de San Andrés (Coralina, 2009, p. 9).

El aprovechamiento del agua se realiza por medio de la perforación y explotación de 32 pozos profundos; 17 de los cuales poseen concesión, ocho (8) en producción debido a dificultades de tipo logístico (cercanía de bombas y acometidas eléctricas) y contenido socioeconómico (problemas de servidumbre) y aspectos técnicos (Coralina, 2005, p. 33).

Figura 35*Concesiones de agua subterránea*

Nota. PMAS- Plan de manejo de las aguas subterráneas 2000-2009- Pozos concesionados (Coralina, 2009, p. 9)

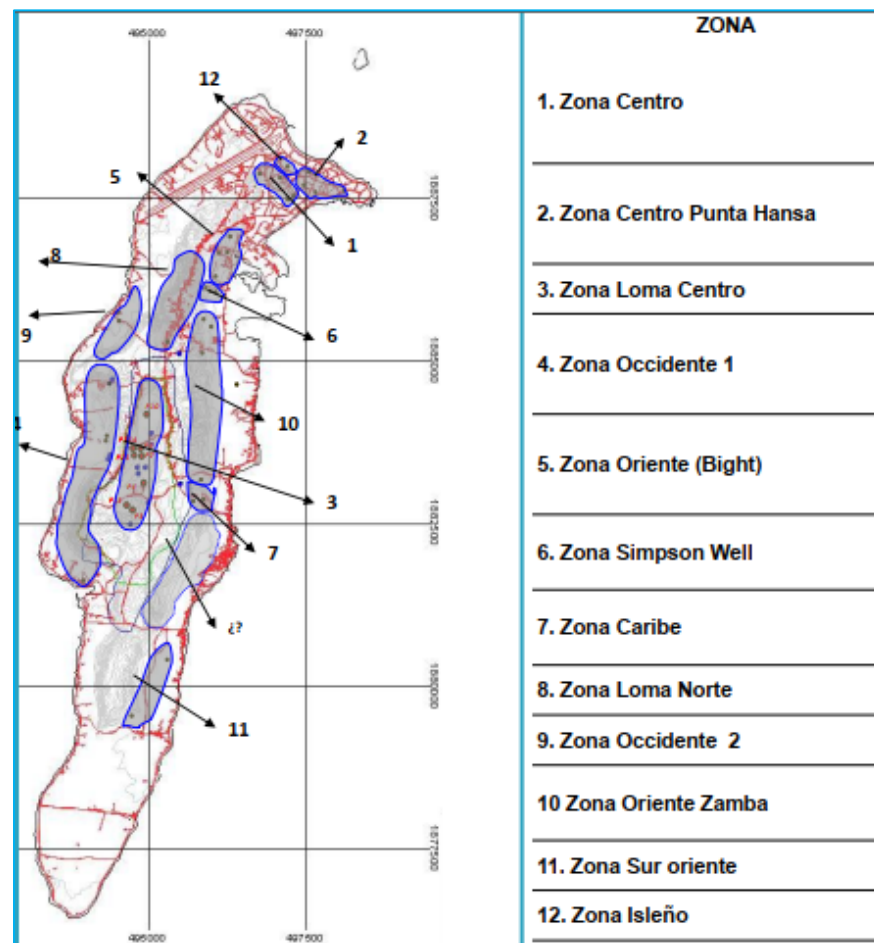
Otros autores estiman en la isla 33 pozos inventariados, independiente del estado de la concesión, así como el registro de 6002 aljibes y 5 manantiales, con una demanda del acuífero para atender 4.9 millones de metros cúbicos por año (Ramírez Martínez & Vargas Mora, 2018, p. 57).

La explotación se lleva a cabo principalmente a partir de pozos profundos perforados en la zona de la falla del Cove. El campo se explota desde 1966 con caudales iniciales de 25 l/s, alcanzando valores de 50 l/s para el año 1985 en donde se presentaron síntomas de sobreexplotación en el acuífero y se tomaron medidas de gestión para lograr un caudal concesionado actual de 30 l/s (Bedoya & Carmona, 2010, pp. 6–7). En la actualidad la explotación se da por encima de los 200 l/s.

Se muestra en la Figura 36 la ubicación de zonas más relevantes de la isla, ya que son los que generan la mayor cantidad de agua para el suministro de la misma.

Figura 36

Ubicación Pozos Isla San Andrés



Nota. Plan de manejo de las aguas subterráneas 2000-2009-Red de monitoreo (Coralina, 2009, p. 23).

Lo antes establecido, es una representación de que si no se le lleva un manejo ambiental adecuado al acuífero se pueden representar pérdidas significativas las cuales puedan llegar a convertirse en una falta de abastecimiento de este suministro al sector de estudio.

5.2.8 Aportes Adicionales de Caudal para el Abastecimiento

Adicionalmente, para el suministro en los últimos años se han instalado una serie de plantas desalinizadoras de agua mar con el fin de lograr el tratamiento de 50 litros por segundo, para atender a la comunidad.

5.2.9 Fuentes de Contaminación

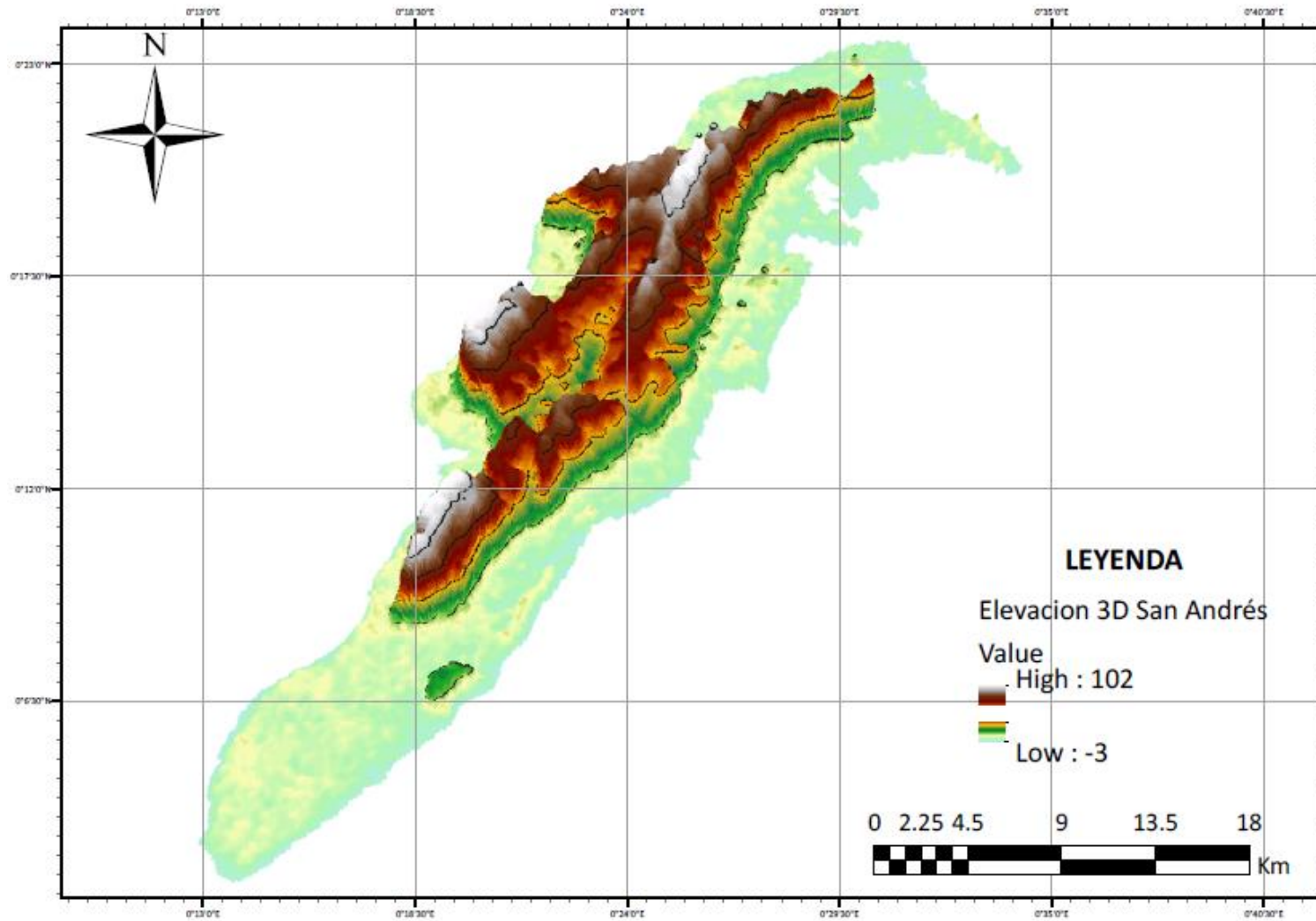
La contaminación del acuífero principalmente en la isla se da por cloruro, compuestos nitrogenados, coliformes fecales y enterococos, detergentes e hidrocarburos (Coralina, 2005, p. 29).

Los sistemas de saneamiento in situ (fosas sépticas, pozos ciegos y otros) de las poblaciones asentadas en las regiones más vulnerables del acuífero (Ghielmi et al., 2008, p. 82), son una fuente de contaminación principal en el territorio, toda vez que parte de estas no poseen los recursos ni el espacio para poder ejecutar un adecuado tratamiento a los contaminantes que ellos mismos generan.

La intrusión salina es uno de los problemas ambientales más graves en muchas regiones costeras de todo el mundo. Por lo tanto, debe prevenirse o al menos controlarse para proteger los recursos de agua subterránea en ambientes costeros (Javadi, Akbar; Hussain, Mohammed S.; Sherif, 2015, p. 1). Por medio de modelos matemáticos se estimó en $0,000759635\text{m}^3/\text{s}$ (Ramirez Martinez & Vargas Mora, 2018, p. 92).

5.2.10 Modelo de Elevación Digital SAI

Para la delimitación de la cuenca se utilizó la guía de elevación digital (DEM), el cual se obtiene partiendo de las planchas cartográficas suministradas por el IGAC, tal como se realizó con el sistema acuífero de Tunja, sin embargo, no fue posible información adicional de partes de las entidades.

Figura 37*Modelo de elevaciones de la isla de San Andrés*

Nota. Modelo digital 3D elevaciones de la isla de San Andrés, que oscilan entre 0 y 85msnm.

5.2.11 Problemática y Amenazas de Agua Subterránea en la Isla

Tal como lo dice Bedoya y Carmona, la isla de San Andrés, depende en la actualidad en más de un 80% del agua subterránea para su abastecimiento, sin embargo, se presentan problemas de gestión del recurso y se tiene poco conocimiento del sistema acuífero (2010, p. 1).

Los acuíferos son un recurso fundamental en las regiones costeras porque sirven como principales fuentes de suministro de agua dulce, en estas zonas las altas tasas de urbanización, aumento de la agricultura (Ferreira Da Silva et al., 2001, p. 2) y para el caso de SAI el turismo ha generado la demanda de aguas subterráneas, con lo que es necesario incrementar la extracción por medio de pozos profundos que han provocado caídas inaceptables y deterioro de la calidad del líquido bombeado por algunos de ellos.

El cambio climático plantea y revela desafíos esenciales para la Región Caribe. Las pequeñas islas se ven afectadas por alteraciones en el ciclo hidrológico, lo que resulta en un fenómeno de "Niño" muy frecuente y severas sequías en el Caribe y Centroamérica. Sin embargo, los problemas del agua no solo se asocian con causas naturales o climáticas, aunque esto sigue siendo una preocupación, están más relacionados con la calidad de servicio y el mantenimiento y operación de la infraestructura.

A juicio de Velásquez múltiples factores a manera de turismo, contaminación de acuíferos, mala gobernanza, construcciones no planificadas, desigualdad social y el costo prohibitivo de acceder al agua tanto formal como informal, han expuesto altos niveles de vulnerabilidad contribuyendo a la configuración de crisis de aguas profundas (2020, p. 75).

En la isla se presenta un fenómeno denominado intrusión marina, este es común en zonas costeras y factor determinante e influyente en islas como las del Caribe colombiano, toda vez que un aumento en el nivel del mar por cambios climáticos, la disminución de presión del acuífero por descargas u otros fenómenos naturales, trae consigo sobre esfuerzos en las paredes del mismo que le terminan inyectando agua de mar.

Habitantes de la isla de San Andrés mantienen una práctica normal este tipos de territorios ilustrada en varias investigaciones y es relacionada como lo menciona (Comte et al., 2016, p. 182) sobre la recolección de agua de lluvia de los techos a tanques, que solo son suficientes durante la temporada de lluvias y tienen problemas de contaminación bacteriana.

Existe una situación compleja y por ende difícil de controlar que es el turismo principal actividad comercial, con datos de las agencias encargadas del control de residencia a la isla arriban más de un millón de turistas al año provenientes de diferentes partes del mundo, esto hace un escenario de impacto permanente y de gran magnitud, que afecta varios entornos en ella, por tanto la cantidad de agua potable necesaria aumenta y por su escases se limitada para los propios habitantes, que por cultura son muy cuidadosos con el ahorro y buen uso del recurso, que por décadas lo habían logrado balancear y convivir en las temporadas secas, sin mayores inconvenientes.

El territorio fue declarado por la UNESCO en año 2000 como reserva de Biosfera “Seaflower” por otras características que conciben de este lugar único en el mundo y el turismo desbordado de los últimos años, personas que arriban a la isla llenas de expectativas de descanso en las hermosas y cálidas playas, aguas cristalinas, el mar de siete colores, con la mente conectada en el derroche, la rumba, que casi nunca se preguntan de dónde sale el líquido que consumen durante su estadía, sin percatarse que irónicamente se encuentran en un sitio rodeado de agua que no es consumible, que la más mínima contaminación la afecta, que prácticamente todo llega por barco y vuelos, inclusive la comida.

Los turistas que la mayoría de los casos no están acostumbrados a condiciones extremas de temperatura y humedad que hace que los consumos promedios de agua se disparen; es común contemplar camiones cisterna dedicados a la venta del recurso a hoteles y negocios derivados del turismo, la oferta y la demanda se vuelven visible y palpable en todo sentido, hasta llegar al punto de desabastecer sus propios residentes por atender medianamente bien al turista, un foráneo que trae consigo uno de los únicos ingresos económicos que los sostienen.

Y llegamos al punto, el acuífero, el cual está en un nivel alto de estrés en su capacidad de extracción debido a la alta influencia de turismo y población nativa, se debe apropiar más caudal del máximo permitido para su conservación. Podemos observar además que los acuíferos de San Andrés presentan una gran falencia en el aprovechamiento de la precipitación que es su principal fuente de vida, el cambio climático, cambios en los regímenes de lluvia que no le dan el mismo tiempo de infiltración y recarga que antes, problemas aparentemente imperceptibles pero que día a día limitan su aforo, presentándose frecuentes inundaciones en áreas urbanas, erosión de playas, contaminación del manglar y demás. En pasados meses la isla vivió una situación crítica de desabastecimiento de agua en algunos sectores, hasta que una comunidad tranquila como la sanandresana protestó en forma masiva salió a las calles a exigir sus derechos, si bien se tomaron algunas medidas paliativas, y de choque se atendió la emergencia, ayudados por la naturaleza vinieron las lluvias y todo supuestamente a la normalidad.

Con el cambio de régimen de precipitaciones en la isla, donde es notable que las nuevas lluvias tienen un periodo más corto de tiempo, lo que trae consigo la incapacidad del agua de filtración en el suelo, inundaciones sectorizadas causadas por la topografía plana del sector y la baja capacidad del sistema de alcantarillado pluvial, y erosión por el aumento de escorrentía superficial hacia el mar.

Como se evidencia el solo factor de tener la misma o mayor cantidad de agua precipitada en un periodo más corto de tiempo, produce en la isla una serie de problemáticas que no permiten la recarga de forma natural del acuífero.

Y con el aumento del nivel del mar extendería la salinización a las aguas subterráneas y a los estuarios, reduciendo así la disponibilidad de agua dulce para las poblaciones y ecosistemas en áreas costeras (Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, 2008, p. 3).

San Andrés Islas, por su posición geográfica en la zona caribe, es altamente vulnerable a las tormentas tropicales y los huracanes; registros históricos reportan eventos huracanados desastrosos en

1932, 1935, 1971, 1984, dos en 1988, recientemente el huracán César, en septiembre de 1996 (Vargas-Cuervo, 2004, p. 76) y en la actualidad Eta y Iota en 2020, con efectos devastadores en Providencia y Santa Catalina.

En San Andrés con el incremento desproporcionado de la población, la llegada de foráneos, turistas e ilegales, al territorio insular aumentan las demandas de agua potable, especialmente en épocas secas, trayendo consigo escases, enfermedades y colapso de los sistemas económicos adicionando los problemas de contaminación de las aguas subterráneas.

Cambio climático - Régimen de lluvias. En el ámbito de las amenazas identificadas en la isla de San Andrés, se encuentra los impactos propios del cambio climático con efectos característicos en el régimen de lluvia, que como se mencionó en capítulos anteriores la precipitación disminuya y no permita el periodo suficiente al suelo para efectuar el proceso natural de infiltración.

Zonas Susceptibles a Inundación y Encharcamiento. Fenómeno que se presenta particularmente en la zona urbana (sector hotelero) y San Luis. Estos eventos se producen por varios aspectos naturales y antrópicos: el contexto geológico geomorfológico sobre antiguas zonas de lagunas y manglares y el dique que constituye la vía circunvalar produce un efecto de “piscina” en la parte baja de la isla, principalmente por deficiencias en el sistema de drenaje (Vargas-Cuervo, 2004, p. 4).

Adicionalmente por acción propia del crecimiento poblacional, construcción de infraestructura para su bienestar, topografía de la isla e impermeabilización del suelo y deficiencias en los sistemas de drenaje, con lo cual es normal apreciar zonas residenciales inundadas y/o con láminas de agua de hasta 80cm, ejemplos mostrados en la Figura 38 y Figura 39 originadas por las precipitaciones debido a la incapacidad de la red de alcantarillado de evacuar de forma eficiente.

Figura 38

Lámina de agua en lluvias del año 2016



Nota. Tomado de (“Emergencia en San Andrés por tormentas e inundaciones - Otras Ciudades - Colombia - ELTIEMPO.COM”, s/f). Lámina de agua en lluvias del año 2016

Figura 39

Lámina de agua por lluvias 2021

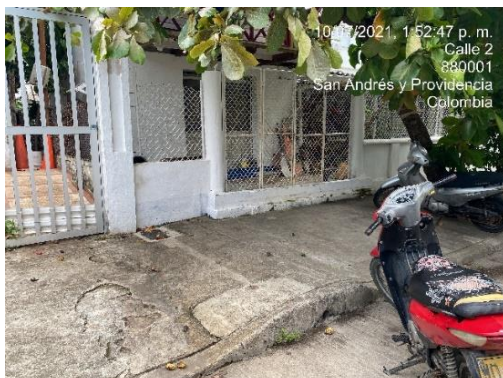


Nota. Precipitación de corta duración, año 2021.

La comunidad Sanandresana es consciente de la problemática del impacto causado por los cambios en las lluvias, por lo cual se construyen barreras mostradas en las Figuras 40 y 41, según la lámina de agua más alta registrada, para evitar su ingreso y daños en sus enceres. Cabe resaltar que con colapso de las redes de drenaje por la alta carga de precipitación se mezclan con aguas servidas y esto agudiza la situación en temas sanitarios.

Figura 40

Barreras de protección barrio Sarie Bay

**Figura 41**

Barreras de protección barrio Sarie Bay



Ascenso del Nivel del Mar. Situación de alto impacto para la Isla de San Andrés la cual analizaremos en el presente estudio, territorio vulnerable a más lluvias en periodos cortos, inundaciones costeras, e intrusión marina problemáticas sensibles que agudizan la contaminación del agua dulce disponible.

Desde el punto de vista de Vargas Cuervo, otros fenómenos amenazantes que pueden afectar a San Andrés, se asocian al cambio climático como la expansión oceánica por el calentamiento global y el ascenso del nivel del mar (1 metro en 100 años); en este caso se afectaría gran parte de la zona urbana al norte de la isla y en el sector de San Luís (2004, p. 77).

Otros fenómenos amenazantes que pueden afectar a San Andrés, se asocian al cambio climático como la expansión oceánica por el calentamiento global y el ascenso del nivel del mar (1 metro en 100 años); en este caso se afectaría gran parte de la zona urbana al norte de la isla y en el sector de San Luís (Vargas-Cuervo, 2004, p. 77).

5.2.12 Datos Ciclo Hidrológico Básico

Con la información recopilada, analizada y calculada en el presente capítulo en la Tabla 7 se resume las características relevantes del ciclo hidrológico del acuífero San Andrés para posterior ingreso en la metodología propuesta, cabe señalar que los datos no encontrados se establecieron con la experiencia de expertos.

Tabla 7

Resumen de Datos estratégicos del Acuífero San Andrés

Ítem	Cantidad	Intervalo		*Unidad	Fuente	Año
		Desde	Hasta			
Manantiales 5	2.700,00			ha	Coralina & Invema	2012
Pozos	32			unidad	Coralina & Invema	2012
Pozos concesionados	17			unidad	Coralina	2005
Pozos en producción	8			unidad	Coralina	2005
Aljibes	6.002,00			unidad	Coralina & Invema	2012
Precipitación	1.894,00			mm/año	Coralina	2005
	1.850,00			mm/año	Vargas-Cuervo	2004

Ítem	Cantidad	Intervalo		*Unidad	Fuente	Año
		Desde	Hasta			
	1.900,00			mm/año	Bedoya	2010
Temperatura		26,5	27,5	grados	Vargas-Cuervo	2004
Evapotranspiración	1.740,00			mm/año	Vargas-Cuervo	2004
Recarga	480	255	810	mm/año	Bedoya & Carmona	2010
	480			mm/año	Coralina	2005
Recarga Artificial	0,17			m ³ /s	Minambiente & Coralina	2013
Extracción en pozos	2.685.650,00			m ³ /año	Coralina	2009
Extracción total de los acuíferos	4.9 millones			m ³ /año	Ramírez Martínez & Vargas Mor	2018
Aportes de plantas de tratamiento desalinizadoras	50			l/s	Coralina	2005
Intrusión salina	0,0007596			m ³ /s	Ramírez Martínez & Vargas Mora	2018

6 Sistemas de Explotación del Recurso Hídrico

6.1 Relación Población vs Disponibilidad de Agua de los Acuíferos a 2040 y 2100

6.1.1 Métodos de Proyección de Población

Los métodos de proyección de población, son parte esencial dentro de un estudio de recurso hídrico, pues con ella se ayuda a verificar el dimensionamiento del uso de este, así como los comportamientos de consumo logrando pronosticar los eventos futuros y lograr saciar a máximo las necesidades de las actividades de la sociedad. Estos se basan en pronósticos del comportamiento (crecimiento o decrecimiento) poblacional de la zona de interés, en el que se usan registros (censos) de habitantes de años pasados.

Método lineal. Basados en lo expuesto por López Cualla, el cual se utiliza dentro de un crecimiento poblacional constante e independiente del tamaño que tenga, acá se integran los límites de último censo y el inicial, obteniendo un valor promedio de pendiente, es un procedimiento teórico y de uso esporádico, pues es un incremento de población poco común.

$$K_a = \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}}$$

k_a = pendiente de la recta

P_{uc} = población de último censo

T_{uc} = año del último censo

P_{ui} = población del censo inicial

T_{ui} = año del censo inicial

Tomando K_a como el promedio entre los censos la ecuación para la población del método lineal se expresa como,

$$P_f = P_{uc} + k_a * (T_f - T_{uc})$$

P_f = población proyectada

T_f = año de la proyectada

Método es el geométrico. Un segundo método, donde se observa que el aumento poblacional es proporcional a su tamaño, acá se aplica un crecimiento similar a un patrón de interés compuesto, utilizando una tasa de incremento anual para calcular la población futura.

$$P_f = P_{uc} * (1 + r)^{T_f - T_{uc}}$$

$$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\left(\frac{1}{T_{uc} - T_{ci}} \right)} - 1$$

Donde, r es la tasa de crecimiento anual obtenida con el método lineal.

Método de Wappus. Un tercer método es Wappus, basado en la tasa de crecimiento anual y el periodo de diseño, tiene limitación para poblaciones altas, situación por la cual no se considera en la proyección de Tunja.

$$P_f = P_{ci} * \left(\frac{200 + i * (T_f - T_{ci})}{200 - i * (T_f - T_{ci})} \right)$$

$$i = \frac{200 * (P_{cu} - P_{ci})}{(T_{uc} - T_{ci}) * (P_{uc} - P_{ci})}$$

Teniendo en cuenta los métodos de proyección se destacan los modelos: lineal, geométrico y Wappus los cuales calculan las tasas de crecimiento entre último censo registrado y cada uno de los posteriores al inicial. (2003, pp. 38–42).

Método de Crecimiento Logarítmico. Esta bajo el criterio que el crecimiento de la población se da de forma exponencial, por la relación existente en los cambios de población respecto al tiempo igual al promedio de censos.

$$\frac{dP}{dT} = K_g * P \rightarrow \frac{dP}{P} = K_g * dT$$

Que para efectos de cuantificación se determinó la ecuación:

$$P_f = P_{ci} * e^{K_g * (T_f - T_{ci})}$$

6.1.2 Población Proyectada para Tunja 2020 a 2100.

El cálculo de población para Tunja se determinó utilizando los métodos de proyección propuestos, basado en los censos observados en la Tabla 8, proyecciones mostradas en las

Tabla 9 a

Tabla 11, según el año que corresponda.

Tabla 8

Datos de Censo y proyección existente para el municipio Tunja

Año	Tunja
2005	154096
2008	164405
2011	174557
2014	184220
2017	195496
2020	206791

Nota. Tomado de tablas de proyección descargadas ("Proyecciones de población", s/f)

Tabla 9

Proyección de población del municipio de Tunja 2021 a 2040

Año	Lineal	Geométrico	Logarítmico	Promedio
2021	210.422	210.780	211.635	210.946
2024	221.931	223.942	225.365	223.746
2027	233.440	237.926	239.987	237.118
2031	244.950	252.784	255.558	251.097
2034	256.459	268.570	272.138	265.722
2037	267.968	285.341	289.795	281.035
2040	279.478	303.161	308.596	297.078

Tabla 10

Proyección de población del municipio de Tunja 2021 a 2070

Año	Lineal	Geométrico	Logarítmico	Promedio
2021	210.422	210.780	211.635	210.946

Año	Lineal	Geométrico	Logarítmico	Promedio
2029	240.085	246.393	248.856	245.111
2037	269.748	288.026	292.624	283.466
2046	299.410	336.695	344.090	326.732
2054	329.073	393.590	404.607	375.757
2062	358.736	460.103	475.768	431.536
2070	388.399	537.859	559.445	495.234

Tabla 11

Proyección de población del municipio de Tunja 2021 a 2100

Año	Lineal	Geométrico	Logarítmico	Promedio
2021	210.422	210.780	211.635	210.946
2034	258.238	271.096	274.795	268.043
2047	306.055	348.678	356.806	337.179
2061	353.871	448.469	463.292	421.877
2074	401.688	576.831	601.559	526.692
2087	449.504	741.946	781.089	657.513
2100	497.321	954.340	1.014.200	821.953

6.1.3 Población Proyectada para Isla de San Andrés a 2020-2100.

El caso de estudio pertenece a la isla de San Andrés, donde se evidencia la problemática señalada que involucra tanto a la población residente y visitante de la zona rural y urbana, se calcula la proyección en las tablas 13 a

Tabla 15, basado en datos de censos mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12

Datos de Censo y proyección existente para la isla de San Andrés

Año	San Andrés
2005	65627
2008	67173
2011	68868
2014	70684
2017	72585
2020	74466

Nota. Tomado de tablas de proyección descargadas ("Proyecciones de población", s/f)

Tabla 13*Proyección de población isla de San Andrés 2021 a 2040*

Año	Lineal	Geométrico	Wappus	Logarítmico	Promedio
2021	75.081	75.108	75.109	75.065	75.091
2024	77.032	77.179	77.185	77.090	77.121
2027	78.982	79.308	79.322	79.169	79.195
2031	80.932	81.495	81.522	81.305	81.314
2034	82.883	83.743	83.788	83.499	83.478
2037	84.833	86.052	86.124	85.751	85.690
2040	86.784	88.426	88.532	88.065	87.952

Tabla 14*Proyección de población isla de San Andrés 2021 a 2070*

Año	Lineal	Geométrico	Wappus	Logarítmico	Promedio
2021	75.081	75.108	75.109	75.065	75.091
2029	80.108	80.563	80.584	80.395	80.413
2037	85.135	86.415	86.492	86.105	86.037
2046	90.162	92.692	92.885	92.220	91.990
2054	95.188	99.425	99.828	98.769	98.302
2062	100.215	106.647	107.393	105.783	105.009
2070	105.242	114.394	115.667	113.295	112.150

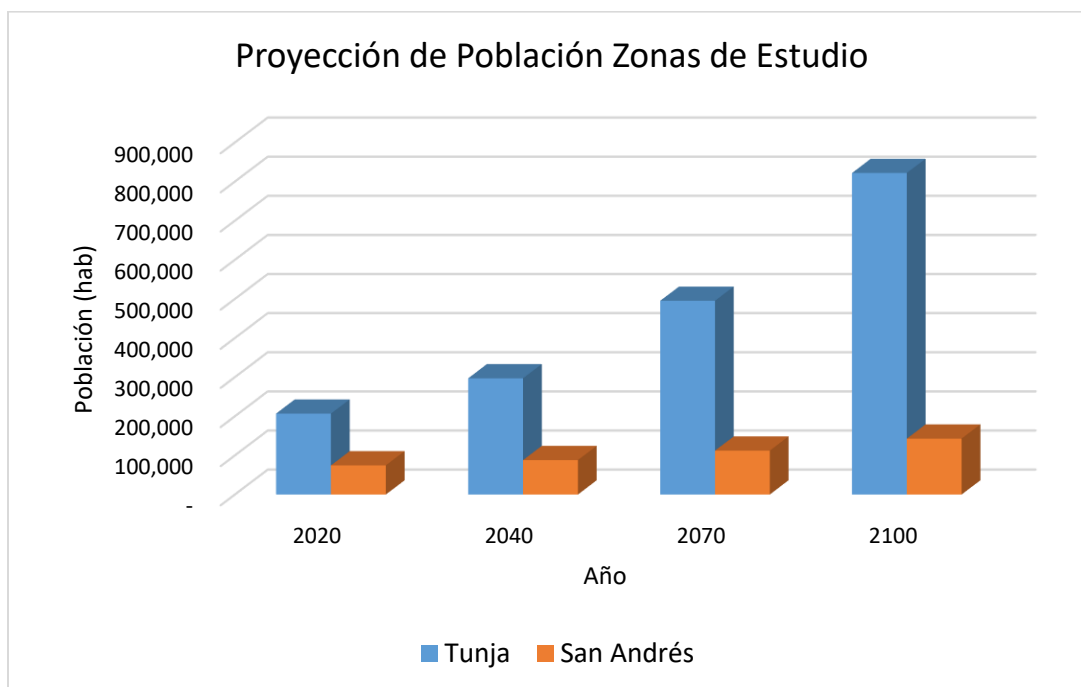
Tabla 15*Proyección de población isla San Andrés 2021 a 2100*

Año	Lineal	Geométrico	Wappus	Logarítmico	Promedio
2021	75.081	75.108	75.109	75.065	75.091
2034	83.184	84.096	84.145	83.843	83.817
2047	91.287	94.159	94.390	93.648	93.371
2061	99.391	105.427	106.106	104.599	103.881
2074	107.494	118.044	119.632	116.832	115.500
2087	115.597	132.171	135.424	130.494	128.422
2100	123.700	147.988	154.105	145.755	142.887

En la Figura 42 se muestra el crecimiento de la población en las zonas de estudio, donde se constata que en ciudad de Tunja tendrá una mayor tasa de incremento comparada con San Andrés, lo cual es factible por el control de residencia y circulación de la isla y las limitaciones de espacio y recursos como el agua.

Figura 42

Comparación de proyecciones de población zonas de estudio



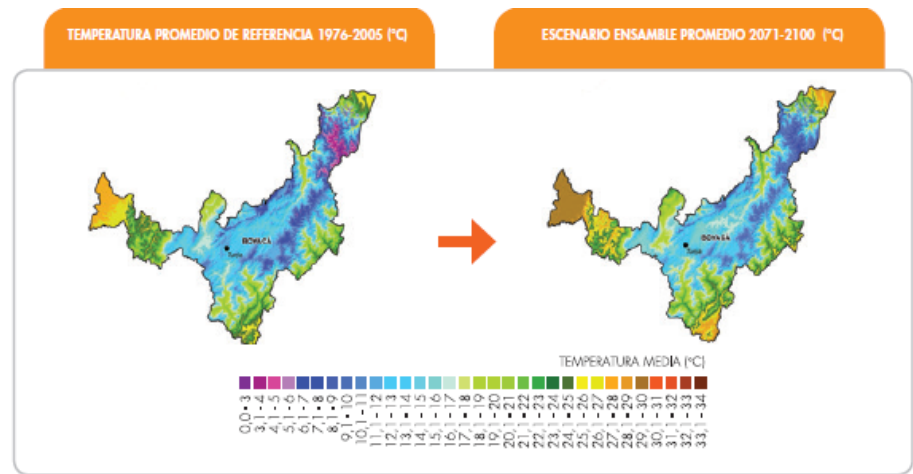
6.1.4 Proyecciones de Precipitación y Temperatura Sistema Acuífero Tunja

Específica para el Departamento. Para el periodo 2071 – 2100 se espera que la **precipitación media aumente** entre 10 a 30% en zonas como el centro de Boyacá. Estos aumentos en las lluvias sumados a los cambios en el uso del suelo pueden incrementar la posibilidad de deslizamientos, afectación de acueductos veredales y daño de la infraestructura vial en áreas de montaña, e inundaciones en superficies planas (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015, p. 15).

En cuanto a la temperatura se incrementará en un promedio de 1.6°C, siendo más fuerte a 2100 donde presentará un aumento de 2.4°C.

Figura 43

Temperatura promedio Boyacá 1976-2005 2071-2100



Nota. Tomado de (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015, p. 28) Temperatura.

Figura 44

Escenarios cambio climático 2021-2100 para Boyacá

Tabla conversión Temperatura		TABLA POR PERIODOS / ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 2011-2100						Tabla conversión Precipitación	
Cambio	Rango de Valores Temperatura	2011-2040		2041-2070		2071-2100		Cambio	%
		Cambio de Temperatura media °C	Cambio de Precipitación (%)	Cambio de Temperatura media °C	Cambio de Precipitación (%)	Cambio de Temperatura media °C	Cambio de Precipitación (%)		
Bajo	0 - 0,5	0,8	5,84	1,6	3,69	2,4	3,19	Déficit Severo	<-40%
Bajo Medio	0,51 - 1							Déficit	-39% y 11%
Medio	1,1 - 1,5							Normal	-10% y 10%
Medio Alto	1,5 - 2							Exceso	11% y 39%
Alto	2,1 - 3,9							Exceso Severo	>40%

Nota. Fuente periodos / escenarios de cambio climático 2011-2100 (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015, p. 28).

Modelación en ArcGIS de Precipitación y Temperatura Sistema Acuífero Tunja. Con los datos suministrados por Corpoboyacá se realizaron diferentes modelos de aspectos climáticos de temperatura y precipitación para los años propuestos (2040, 2070 y 2100) en la zona de estudio del sistema acuífero de Tunja, los cuales son mostrados en la Figura 45 a la Figura 50, visto a mayor detalle en el Anexo 1. Planos.

Figura 45

Mapa de proyección Precipitación Acuífero Tunja año 2040

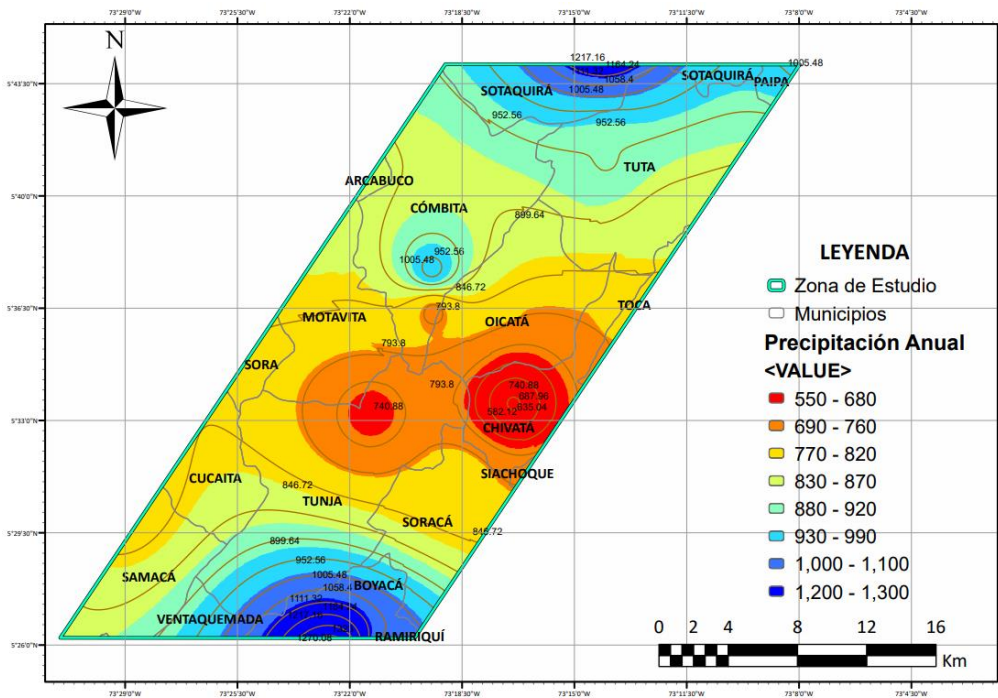


Figura 46

Mapa de proyección Precipitación Acuífero Tunja año 2070

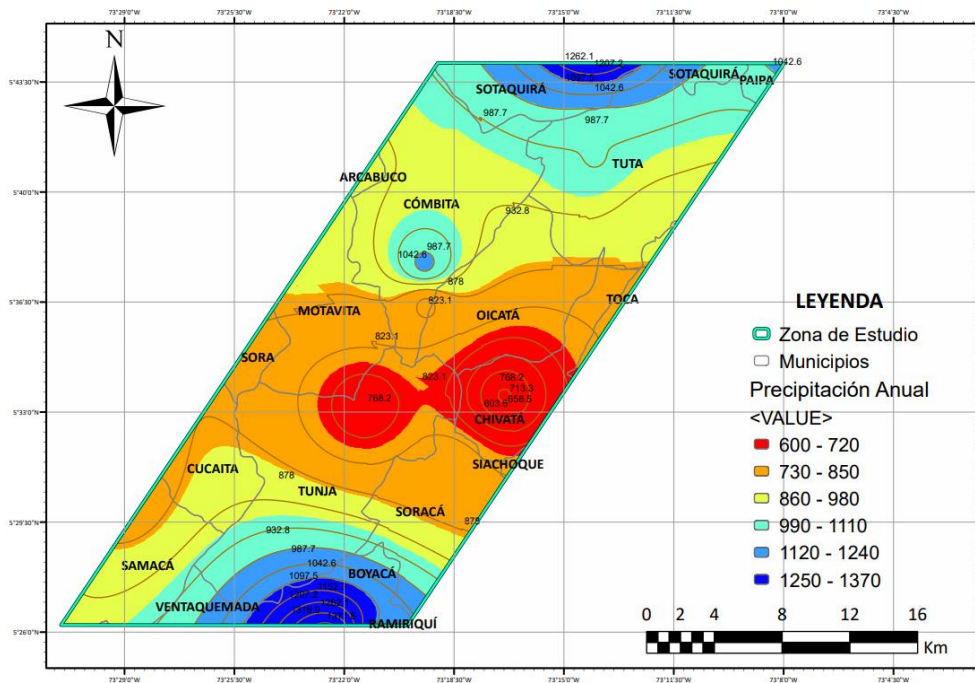


Figura 47

Mapa de proyección Precipitación Acuífero Tunja año 2100

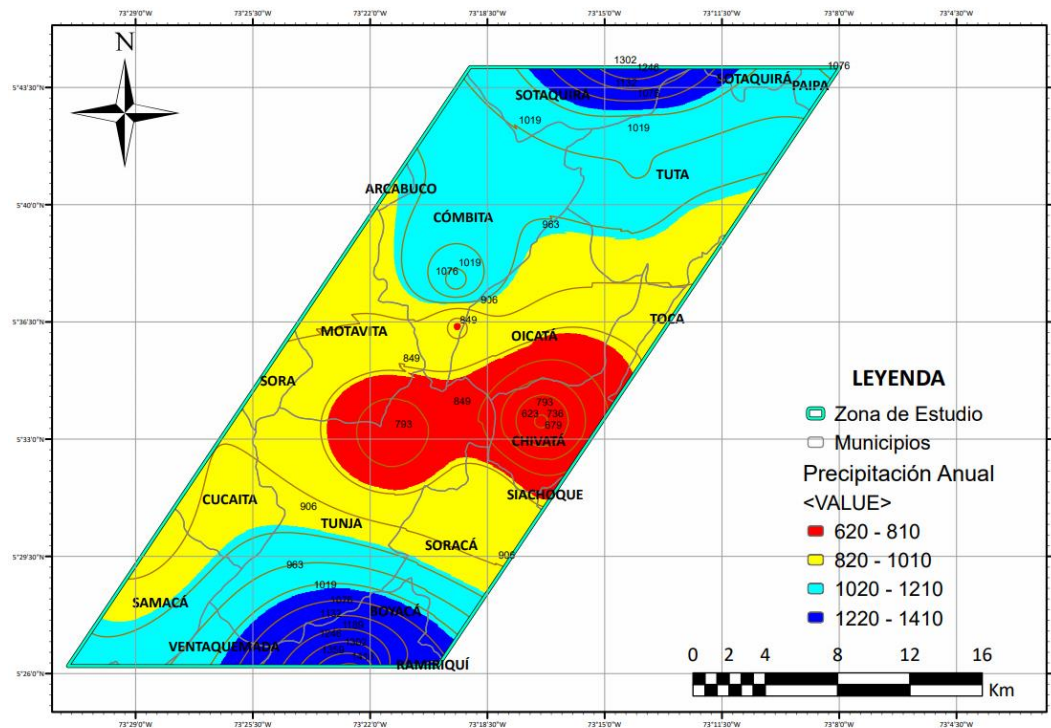


Figura 48

Mapa de Proyección Temperatura Acuífero Tunja año 2040

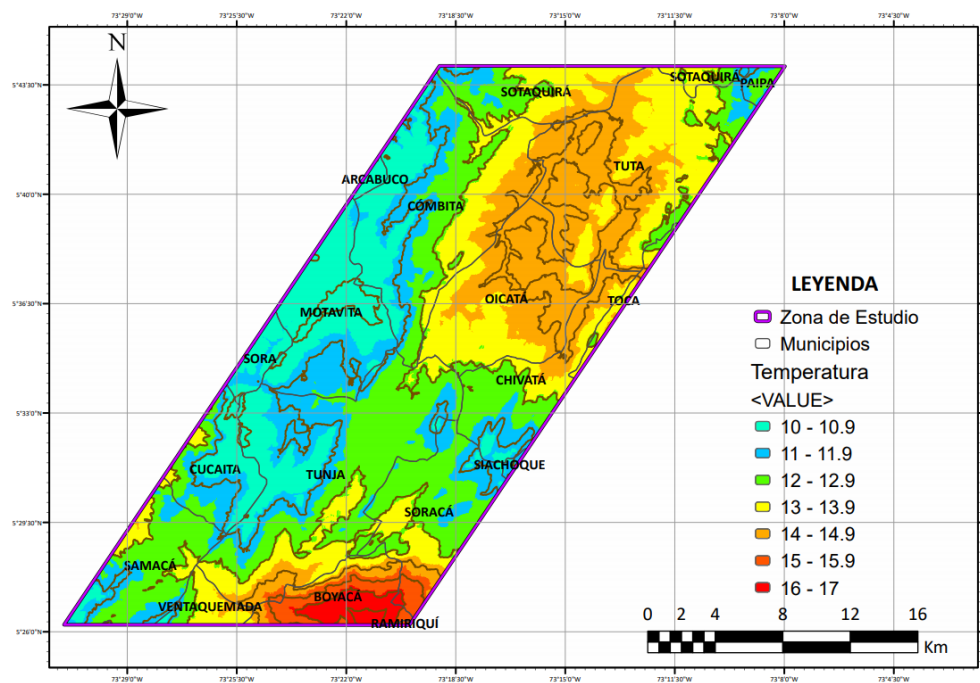


Figura 49

Mapa de Proyección Temperatura Acuífero Tunja año 2070

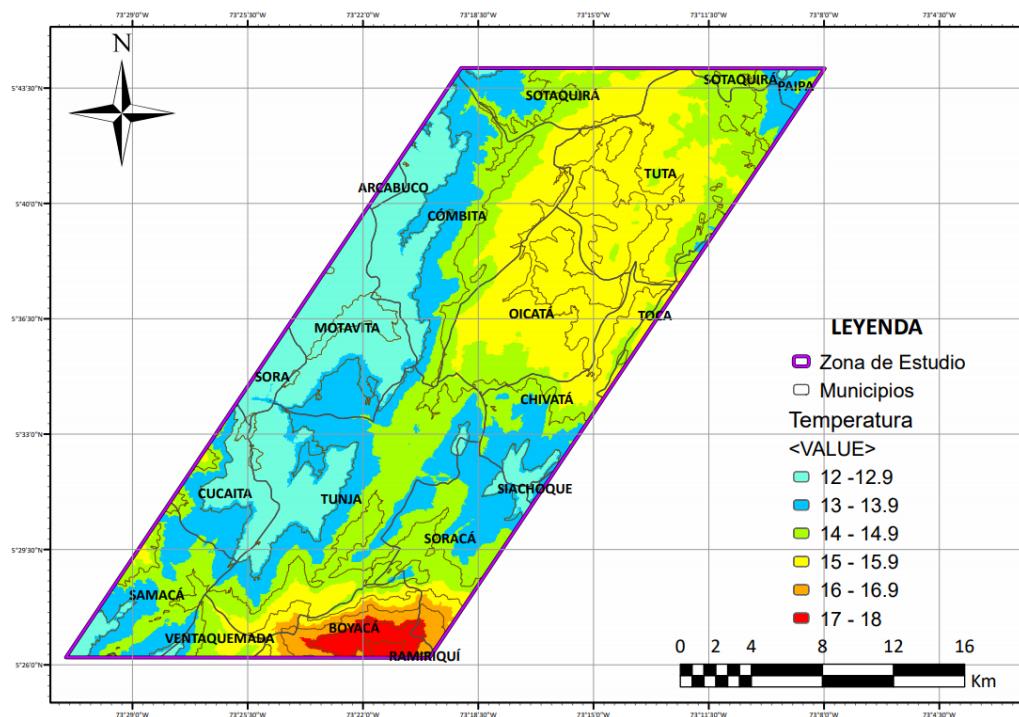
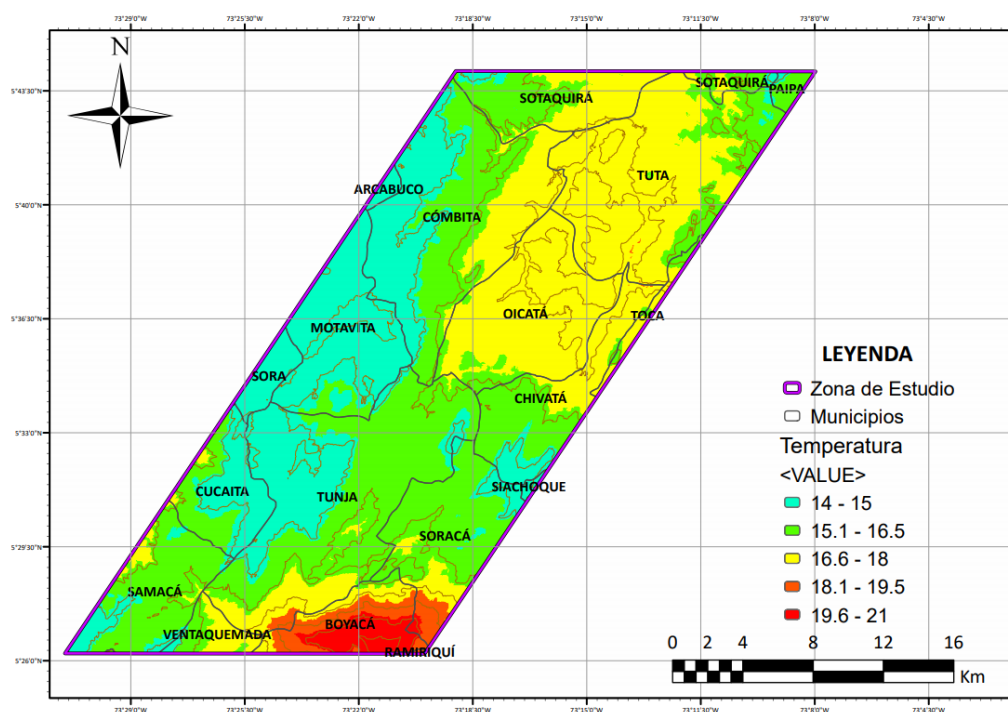


Figura 50

Mapa de Proyección Temperatura Acuífero Tunja año 2100



6.1.5 Proyecciones San Andrés Precipitación y Temperatura

Para el periodo 2071 – 2100, se espera que la **precipitación media disminuya** entre 10 a 30% en zonas como San Andrés y Providencia. Estas reducciones en las lluvias sumadas a los cambios en el uso del suelo pueden acelerar e intensificar los procesos de desertificación y pérdida de fuentes y cursos de agua, con los consecuentes impactos sobre la salud humana, la producción agropecuaria y forestal, la economía y la competitividad regional (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015, p. 15).

En cuanto a la temperatura se incrementará en un promedio de 0.8°C, siendo más fuerte a 2100 donde presentará un aumento de 2.0°C.

Figura 51

Cambio climático 2021-2100 Isla de San Andrés

Tabla conversión Temperatura		TABLA POR PERIODOS / ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 2011-2100						Tabla conversión Precipitación	
Cambio	Rango de Valores Temperatura	2011-2040		2041-2070		2071-2100		Cambio	%
		Cambio de Temperatura media °C	Cambio de Precipitación (%)	Cambio de Temperatura media °C	Cambio de Precipitación (%)	Cambio de Temperatura media °C	Cambio de Precipitación (%)		
Bajo	0 - 0,5	0,8	-30,20	1,4	-32,78	2,0	-33,01	Deficit Severo	<-40%
Bajo Medio	0,51 - 1							Deficit	-39% y 11%
Medio	1,1 - 1,5							Normal	-10% y 10%
Medio Alto	1,5 - 2							Exceso	11% y 39%
Alto	2,1 - 2,9							Exceso Severo	>40%

Nota. Fuente Tabla por periodos / escenarios de cambio climático 2011-2100 (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA, 2015, p. 48)

7 Desarrollo y Consolidación de los Productos de Investigación (Resultados)

Sen este capítulo se sugiere evaluar la sostenibilidad de los sistemas de explotación, ayudados de un monitoreo continuo a las aguas subterráneas, en busca de estrategias para la gestión dentro de un contexto ecológico, social y económico.

7.1 Metodología de Gestión del Recurso Hídrico en Acuíferos

7.1.1 Descripción de Metodología

El punto de partida de esta investigación se remota a la recopilación bibliográfica, con la que se basa este proyecto, destacando sus principales características como lo es, geografía, geológica, climática, hidrológica para cada zona de estudio.

Posteriormente se procede a analizar la información recompilada la cual nos da una visión amplia para el desarrollo del proyecto.

Basando en estudios, análisis y nuevos cálculos encontrados se evalúo diferentes fenómenos para las áreas de estudio con varios escenarios para el desarrollo de este proyecto el cual es base analizar la sostenibilidad del recurso hídrico en zonas que se abastecen de acuíferos para consumo humano.

La metodología planteada consiste en la búsqueda, recopilación y análisis de información referentes a las zonas de estudio, donde se contó con documentos técnicos de las corporaciones regionales, administraciones municipales, gobernación, artículos científicos, normatividad, y otros obtenidos con mediciones en sitio, estadísticas, aplicación de sistemas de ecuaciones, aproximaciones realizadas por especialistas en el tema (panel de expertos).

Lo más recomendable es realizar una serie de mediciones históricas y medición directa en cada situación, utilizando equipos y nuevas tecnologías y software especializado para el procesamiento de la información.

Toda vez que existe una alta confianza en que la alta resolución modelos globales, regionales e hidrológicos proporcionan una mejor representación de las superficies terrestres, incluyendo topografía, vegetación y cambios de uso de la tierra, que pueden mejorar la precisión de las simulaciones de cambios en el ciclo del agua (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021a).

Se establece una metodología fundada en un método investigativo centrada al estudio del recurso hídrico de los acuíferos del sistema zona de Tunja y la Isla de San Andrés, además acompañado de uno explicativo donde por medio de programas llegamos a un resultado objeto del análisis encontrando causa efecto.

Para el desarrollo de la metodología se considera la cantidad de agua que pasa por un sistema en un tiempo determinado, expresado en *flujo volumétrico* (Q) entendido como el “volumen del fluido que circula en una sección por una unidad de tiempo” (Potter et al., 2015, p. 154) y se calcula con la siguiente ecuación:

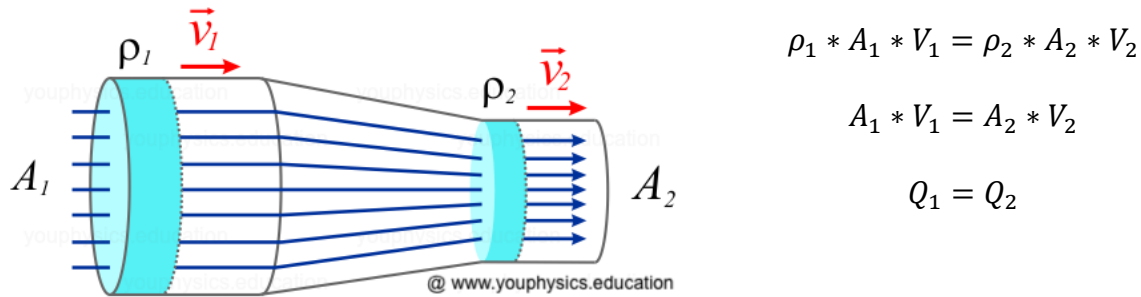
$$Q = A * v$$

Q=flujo volumétrico, expresado en m³/s

A = es el área de la sección m².

v= es la velocidad promedio del flujo m/s.

Ahora bien, aplicando el principio de continuidad de la masa mostrado en la Figura 52, donde la cantidad de fluido que ingresa al sistema es el mismo que sale y considerando que la densidad del agua no varía encontramos las siguientes expresiones:

Figura 52*Ecuación de continuidad*

Nota. Consultado de (“Ecuación de continuidad”, s/f) y (Potter et al., 2015).

Para desarrollo se utilizó un software denominado PTC Mathcad Prime, para realizar cálculos de ingeniería con precisión, siendo comprensible en su utilización y aplicabilidad, es un programa que brinda ayuda con un ambiente de trabajo agradable ante cualquier tipo de cálculo que se presente, es de fácil comprensión, es coherente con las unidades utilizadas.

Es un software estándar en la industria para resolver, analizar y compartir los cálculos de ingeniería, apoya las gráficas de trazado en los cálculos de ingeniería para impulsar la excelencia en el diseño de productos, predecir el comportamiento del diseño, promoviendo parámetros y dimensiones críticos. Es una herramienta única que permite hacer cálculos precisos con facilidad, mejorar la visualización de los datos con trazados 2D y proteger la propiedad intelectual.

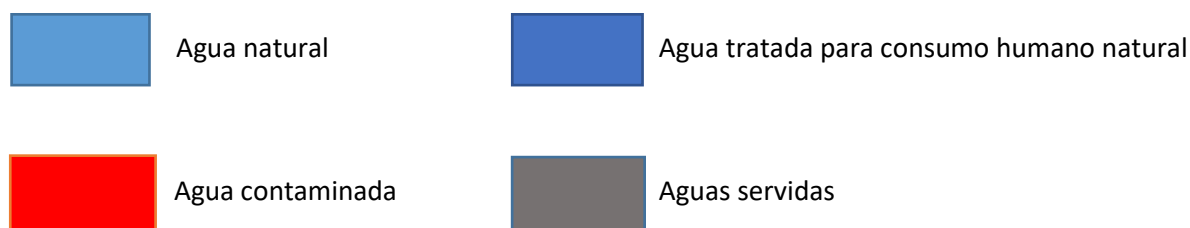
Ofrece una clave matemática en tiempo real, inteligencia de unidades y una capacidad potente de cálculo, todo esto dentro de una interfaz fácil de usar. (“Prestaciones de PTC Mathcad | Mathcad”, s/f)

Para el segundo componente se utilizó el software STAN (Substance Flow Analysis) documento el cual se encontró bastante creativo al momento de la representación gráfica que requería la investigación. Aunque relativamente no es usado con frecuencia en Colombia, presenta una ayuda

didáctica, visual y capacidad robusta de procesamiento de datos para la realización de gráficos y mapas mentales dándole un aspecto cómodo al usuario, tal como se describe Cencic y Rechberger, donde:

El análisis de flujo de materiales (MFA) es una evaluación sistemática de los flujos y existencias de materiales dentro de un sistema definido en el espacio y el tiempo. Conecta las fuentes, las vías y los sumideros intermedios y finales de un material. Debido a la ley de conservación de la materia, los resultados de un MFA se pueden controlar mediante un simple balance de materiales que compara todas las entradas, existencias y salidas de un proceso. Es esta característica distintiva de MFA que hace que el método sea atractivo como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de recursos, gestión de residuos y gestión ambiental. Un MFA ofrece un conjunto completo y coherente de información sobre todos los flujos y almacenamiento de un material particular dentro de un sistema. Al equilibrar las entradas y salidas, los flujos de desechos y las cargas ambientales se hacen visibles, y se pueden identificar sus fuentes. El agotamiento o la acumulación de existencias de materiales se identifican lo suficientemente temprano como para tomar contramedidas o para promover una mayor acumulación y utilización futura. Además, los cambios menores que son demasiado pequeños para ser medidos en escalas de tiempo cortas pero que podrían conducir lentamente a daños a largo plazo también se hacen evidentes (Cencic & Rechberger, 2008).

El usuario tiene la libertad de usar el método de unidades de su predilección, sin embargo, para el desarrollo del presente proyecto se usa sistema internacional y caudales en términos de m^3/s , haciendo uso de otras unidades para tener orden de magnitud en todo momento. La metodología establece una convención de colores detallados en la Figura 53 para identificar la calidad del agua pasa como ayuda visual.

Figura 53*Convención de colores*

El modelo matemático se redujo al mínimo posible buscando garantizar la mayoría de los procesos que se presentan en un sistema abastecido por aguas subterráneas y que sea aplicado con facilidad a cualquier otro de su tipo.

Los dos componentes de la metodología se complementan ya que el primero son los insumos que se ingresan en el segundo, permitiendo al lector tener toda la información del sistema tanto cálculos, diagramas y gráficas, brindando facilidad al usuario para posteriores análisis y toma de decisiones respecto al tema estudiado.

Tabla 16*Procesos establecidos en la metodología*

Ítem	Proceso
P1_Superfi	Superficie Capa Vegetal
P2_Subsuel	Subsuelo
P3_Acuífer	Acuífero
P4_PTAP_AC	*PTAP Agua del Acuífero
P5_PTAP_AA	*PTAP Aportes adicionales
P6_Poblaci	Población
P7_Fosas_S	Fosa séptica o pozo séptico
P8_PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual

Nota. *PTAP- Planta de tratamiento de agua potable

Tabla 17

Ingresos, flujos y salida establecidos en la metodología

Nombre corto	Nombre	Desde	Hasta
F1_Sup-Pob	Consumo Directo de agua lluvia	P1_Superfi,Superficie Capa Vegetal	P6_Poblaci,Población
F2_Sup-Sub	Infiltración	P1_Superfi,Superficie Capa Vegetal	P2_Subsuel,Subsuelo
F3_Con_inf	Contaminación infiltrada Superficie Suelo	P1_Superfi,Superficie Capa Vegetal	P2_Subsuel,Subsuelo
F4_Po-Sub	Retorno de la agua no consumida por la población a la superficie (P_S)	P6_Poblaci,Población	P1_Superfi,Superficie Capa Vegetal
F5_PTA_Sup	Perdidas PTAP a Superficie	P5_PTAP_AA,PTAP Aportes adicionales	P1_Superfi,Superficie Capa Vegetal
F6_Sub-Acu	Recarga natural del acuífero	P2_Subsuel,Subsuelo	P3_Acuífer,Acuífero
F7_ConS_A	Contaminación Subsuelo al acuífero	P2_Subsuel,Subsuelo	P3_Acuífer,Acuífero
F8_PTA-Sub	Perdidas PTAP Extraída a Subsuelo	P4_PTAP_AC,PTAP Agua del Acuífero	P2_Subsuel,Subsuelo
F9_FS-Acu	Contaminación FS a Acuífero	P7_Fosas_S,Fosa séptica	P3_Acuífer,Acuífero
F10_Acu-Po	Extracción SIN tratamiento	P3_Acuífer,Acuífero	P6_Poblaci,Población
F11_Ac-PA	Extracción para tratamiento	P3_Acuífer,Acuífero	P4_PTAP_AC,PTAP Agua del Acuífero
F12_PA-Pob	Distribución Acuífero	P4_PTAP_AC,PTAP Agua del Acuífero	P6_Poblaci,Población
F13_PTA-Po	Distribución AA	P5_PTAP_AA,PTAP Aportes adicionales	P6_Poblaci,Población
F14_PTA-PR	Perdidas SA	P5_PTAP_AA,PTAP Aportes adicionales	P8_PTAR,Planta de Tratamiento de Agua Residual
F15_Po-FS	Distribución a usuarios con FS	P6_Poblaci,Población	P7_Fosas_S,Fosa séptica
F16_Po-PR	Redes de Alcantarillado	P6_Poblaci,Población	P8_PTAR,Planta de Tratamiento de Agua Residual
F17_FS-PTR	FS a Colector	P7_Fosas_S,Fosa séptica	P8_PTAR,Planta de Tratamiento de Agua Residual
I1_Precipi	Precipitación	INGRESO	P1_Superfi,Superficie Capa Vegetal
I2_Con_Sup	Contaminación superficie	INGRESO	P1_Superfi,Superficie Capa Vegetal
I3_Con_Sub	Contaminación al subsuelo	INGRESO	P2_Subsuel,Subsuelo
I4_ApAdici	Aportes Adicionales	INGRESO	P5_PTAP_AA,PTAP Aportes adicionales
I5_RA	Recarga Artificial	INGRESO	P3_Acuífer,Acuífero
S1_Evapo	Evapotranspiración	P1_Superfi,Superficie Capa Vegetal	EGRESO

Nombre corto	Nombre	Desde	Hasta
S2_Esc_Sup	Escorrentía Superficial	P1_Superfi,Superficie Capa Vegetal	EGRESO
S3_Esc_Sub	Escorrentía Subterránea	P2_Subsuel,Subsuelo	EGRESO
S4_Po_Rec	Descargas directa de aguas servidas CR	P6_Poblaci,Población	EGRESO
S5_De_PTAR	Descarga Cuerpo Receptor	P8_PTAR,Planta de Tratamiento de Agua Residual	EGRESO

Nota. PTAP- Planta de tratamiento de agua potable, FS- fosa séptica, AA – Aportes adicionales, Perdidas

SA- Perdidas de agua ingresada a la PTAP que van al sistema de drenaje.

7.1.2 Componente A. Ingreso, Procesamiento y Análisis en Software Mathcad Prime

En el primer componente que se utiliza Mathcad Prime con el ingreso y procesamiento de la parte numérica, indica el cálculo de cifras del acuífero de las aguas subterráneas, para ello se tiene una hoja programada la cual maneja datos de entrada característicos del sistema.

Información extraída de las diferentes fuentes con los análisis respectivos para los dos casos de aplicación, para el tema de la dotación neta máxima se considera lo ordenado en el artículo 43 de la Resolución 0330 de 2017 ministerio de vivienda, ciudad y Territorio de Colombia, en la que establece que para ciudades como Tunja (>2000m.s.n.m) es de 120litros/habitante/día, y para San Andrés de 140litros/habitante/día, por estar ubicada a menos de los 1000m.s.n.m.

En igual sentido, la empresa prestadora de servicio de agua potable tiene establecida la dotación neta para Tunja en 100litros/habitante/día (Veolia, 2017, p. 14). Referente al tema de contaminación en superficie de residuos de insumos agrícolas, aceites, aguas grises, no existe mayor información, razón por la cual se estimaron.

Realizando la tarea anterior el programa calcula si la cantidad de agua disponible en el acuífero es suficiente para atender la población que se ingresa, además hace un resumen del balance donde encontramos fácilmente que entradas y salidas de caudal tiene y que ciclos internos realiza.

En el componente A se hace una entrada de ocho niveles de información del sistema que el usuario previamente cuenta como áreas de cuenca, recarga, precipitación, temperatura media, infiltración, escorrentía, población atendida, porcentaje de pérdidas en los sistemas, caudal tratado, contaminación (intrusión marina, aceites, aguas por actividad agrícola), volumen de agua extraídos del acuífero ya sea para tratamiento o consumo directo, recarga gestionada, entre otros.

La obtención de los datos de entrada preferiblemente debe realizarse con mediciones reales de la zona de estudio y/o estudios confiables (aplicado), procedimiento que se ajustará a la realidad del ciclo, sin embargo, es claro que algunos de ellos se deben obtener de la experiencia, de panel de expertos, e incluso de la comunidad que tendrán un rango de incertidumbre y aproximaciones en el desarrollo de cada componente.

Con el ingreso por parte del usuario de la totalidad de datos antes señalado, se realiza una serie de cálculos haciendo un balance de masas en termino de volumen por unidad de tiempo, continuo en ocho procesos donde por simplicidad de la metodología el único que tiene almacenamiento es el acuífero, con el fin de establecer la condición sobreexplotación o reserva suficiente para atender demandas.

En el ítem de cálculos muestra las precipitaciones en las superficies, llevadas a caudal, en el total del área de la cuenca, en la zona de recarga, con evaluación de la evapotranspiración real aplicando la fórmula de Turc, infiltración del suelo, caudal requerido para la demanda, recarga realizada, al final otorga un balance que indica las entradas y salidas de caudal y procesos internos.

Ecuación de Turc

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25 * T + 0.5 * T^3$$

ETR=Evapotranspiración anual en mm/año

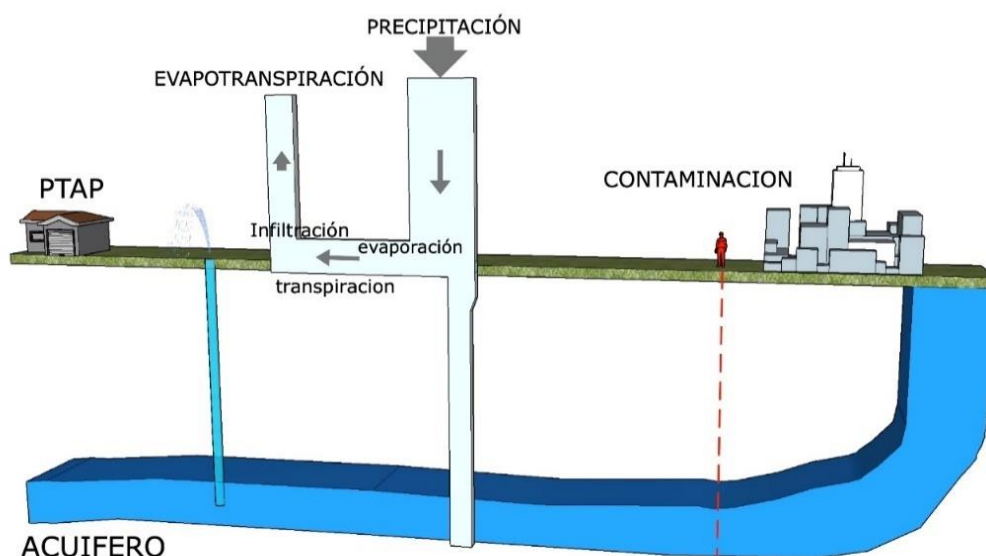
P=Precipitación en mm/año

T=Temperatura media anual en °C

El componente A informa al usuario características y alertas a tener en cuenta en caso para una nueva reevaluación y/o análisis de la información obtenida. Terminado el procesamiento matemático en aras de sintetizar el sistema analizado se presenta un resumen de montado sobre la Figura 54 con los datos más relevantes para mejor comprensión de los usuarios y actores.

Figura 54

Ciclo básico del sistema analizado



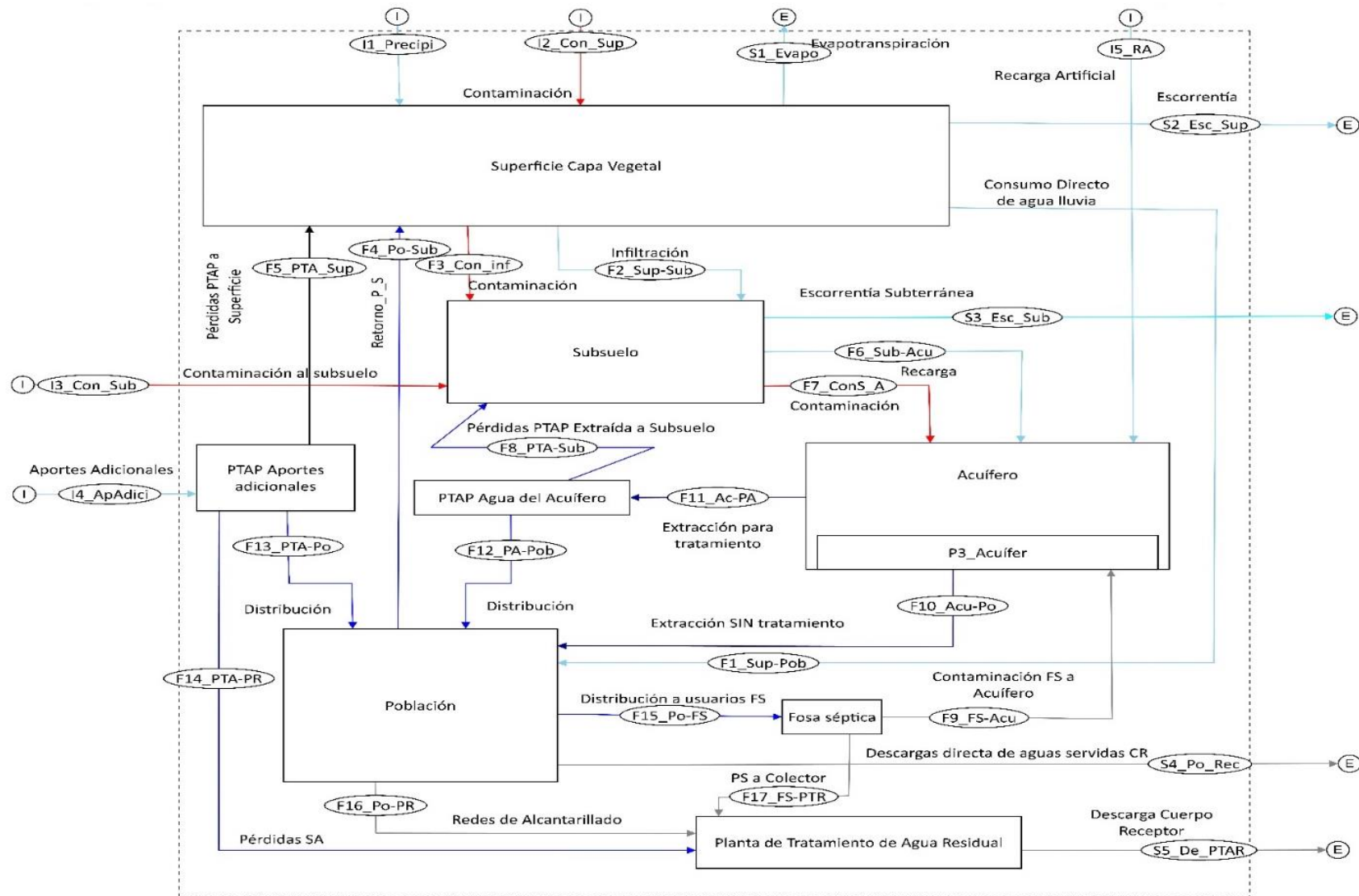
7.1.3 Componente B. Ingreso, Procesamiento y Análisis de Información en Software Stan

Posteriormente en la terminación de la metodología utilizada encontramos un componente numérico gráfico, realizada en Stan donde los resultados (balance) obtenidos para el acuífero de estudio bajo la diagramación presentada en la Figura 55, se divide en tres partes que son los ingresos al sistema, los ciclos de cada proceso y las salidas.

El modelo matemático realiza balances de volumen en unidad de tiempo (caudales L^3/t), con 5 ingresos, 8 procesos macros en el sistema, 17 flujos entre procesos internos y 5 egresos.

Figura 55

Procesos y flujos de la Metodología



7.2 Productos Generados con la Metodología Establecida

7.2.1 Acuífero Sector Tunja 2021- I. Estado Actual

En esta etapa se ejecuta la metodología para el sector del sistema de acuíferos de la Tunja en las condiciones actuales (mostrado en Anexo No. 2), estudiado únicamente en el municipio de Tunja considerando la magnitud de la explotación y población a beneficiar que impacta en el acuífero.

En las Figuras 56 y 57 se muestran los datos de entrada con los cuales se realizó la modelación del escenario.

Figura 56

Entrada de datos

1. DATOS DE ENTRADA	
1.1 Datos generales para el ciclo	
Área cuenca	$A_{Cuenca} := 373.87 \text{ km}^2$
Área zonas de recarga	$A_{Recarga} := 75.16 \text{ km}^2$
Precipitación	$P := \frac{(730 + 820)}{2} \frac{\text{mm}}{\text{yr}} = 775 \frac{\text{mm}}{\text{yr}}$
Temperatura °C	$T := \frac{(9.4 + 17)}{2} = 13.2$
Infiltración Recarga	$I_R := 51704152 \frac{\text{m}^3}{\text{yr}} = 1.6384 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Escurrimiento	$S := 35995405 \frac{\text{m}^3}{\text{yr}} = 1.14 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Población perteneciente al sistema de acueducto	$D_{Neta} := 120 \frac{\text{L}}{\text{hab} \cdot \text{day}}$
Dotación neta	$Poblacion := 200000 \cdot \text{hab}$
Perdidas teóricas en los sistemas	$Per_{Teóricas} := 22\%$
Porcentaje de agua retornada a la Superficie por la población	$P_{Agua_Retorno_superficie} := 5\%$
Porcentaje de descargas a cuerpo receptor sin paso por sistema de alcantarillado (Usuarios no conectados a los sistemas de drenaje)	$P_{Des_Usuarios_No_Conectados} := 1\%$
Evapotranspiración Real en la cuenca de estudio	$ETR_{Cuenca} := 6.4398 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 203220291.89 \frac{\text{m}^3}{\text{yr}}$

Figura 57

Continuación Entrada de datos

1.2 Agua de otras fuentes para abastecimiento (superficial, de mar, trasvase)

Caudal de entrada de otras fuentes	$Q_{AA} := 0.28 \frac{m^3}{s}$
------------------------------------	--------------------------------

Perdidas a la superficie %	$P_{AA_Sup} := 8.57\%$
----------------------------	-------------------------

Perdidas a la red de drenaje %	$P_{AA_Drenaje} := 20\%$
--------------------------------	---------------------------

1.3. Agua contaminada ingresando a la superficie y luego se infiltra y al subsuelo (intrusión marina)

Caudal que ingresa contaminado a la superficie	$Q_{Cont_S} := 0.007 \frac{m^3}{s}$
--	--------------------------------------

Caudal de ingresado contaminado Subsuelo	$Q_{Conta_Directa_Sub} := 0.005 \frac{m^3}{s}$
--	--

1.4. Explotación de pozos

Caudal Extraído por pozos Legalmente para tratamiento	$Q_{Extraido_Pozos} := 2294722 \frac{m^3}{yr} = 0.07 \frac{m^3}{s}$
---	--

Perdidas %	$P_p := 5\%$
------------	--------------

Caudal Extraído por pozos Sin tratamiento	$Q_{E_P_Sin_Tratamiento} := 0.00010 \frac{m^3}{s}$
---	---

1.5 Consumo Directo

Población no pertenece al sistema de acueducto (consumo directo) y/o utiliza el agua lluvia	$Poblacion_{Cons_Directo} := 200 \cdot hab$
---	--

1.6 Habitantes contaminando directamente al acuífero

Población en zonas de recarga con descarga de aguas servidas por medio de pozos sépticos y porcentaje regresado al acuífero	$Poblacion_{Pozos_Septicos} := 50 \cdot hab$
---	---

	$P_{Cont_Acuifero} := 50\%$
--	------------------------------

1.7 Recarga Gestionada de Acuíferos (recarga Artificial)

Caudal para hacer la recarga de forma gestionada del acuífero	$Q_{Recarga_Gestionada} := 0 \frac{m^3}{s}$
---	--

La evapotranspiración estimada de $8.51 m^3/s$, esta alta para el cálculo de balance por lo tanto se ajustó a $6.44 m^3/s$, para mantener la igualdad, atendiendo lo formulado por Turc y registros propios del acuífero, la metodología es susceptible de cambio en cualquiera de los datos de entrada lo cual hacen sensible dicho resultado.

Al acuífero ingresa un caudal de $1.64 m^3/s$, del cual se extraen $0.07 m^3/s$, con un almacenamiento $1.57 m^3/s$, esta situación de impacto en sistema y con ello se puede establecer un comportamiento

adecuado sin inconvenientes de seguir la explotación de agua subterránea como se está dando. Tal situación positiva es atribuible entre otros, a la baja utilización del caudal máximo autorizado para la extracción, sin embargo, en caso de aumento el comportamiento cambia lo cual se refleja en los siguientes análisis observados en Anexo 3 y 4.

Por otra parte, el caudal que ingresa tanto del embalse Teatinos como de la explotación de los pozos profundos está al límite con las necesidades y consumo de la población, pero cualquier cambio en el suministro será perjudicial, que hace sensible al sistema. Ante tal panorama se recomienda la búsqueda, evaluación y puesta en marcha de un tercer sistema de abastecimiento para la capital.

A manera de ilustración en la Figura 58 se observa parcialmente los pasos matemáticos que se realizan en Matchad para el balance de masas de cada proceso, donde se hace la descripción del procesos, cálculos, entradas y salidas identificados con los colores previamente establecidos.

Figura 58

Pasos de Calculo Balance de masas

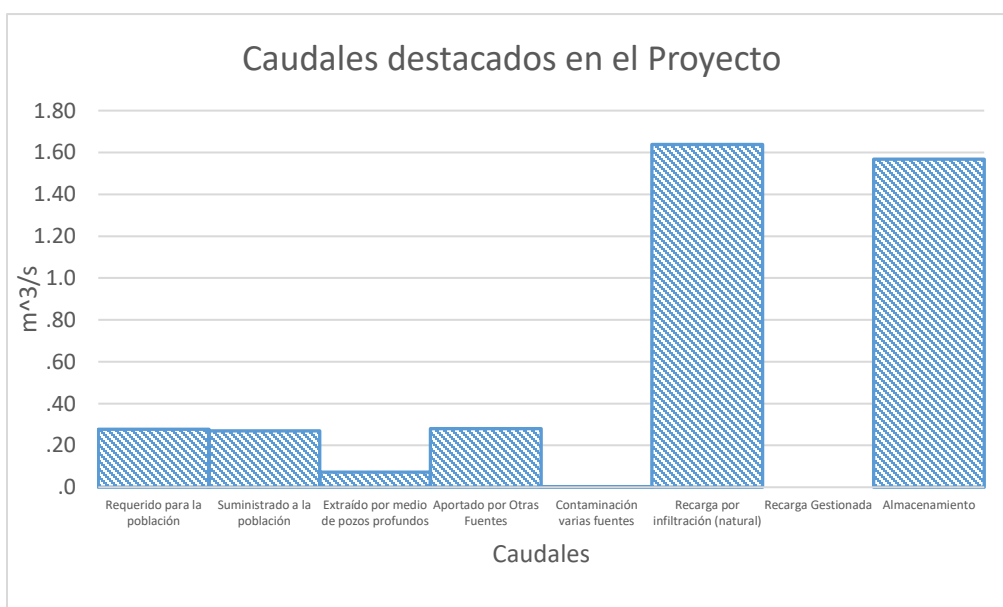
2. CALCULOS			
2.1 Proceso Superficie Capa vegetal (Precipitaciones en las superficies)			
Descripción	Calculos	Entradas (I)	Salidas (E)
Caudal precipitado en la cuenca	$Q_{Cuenca} := P \cdot A_{Cuenca}$ $Q_{Cuenca} = 289749250 \frac{m^3}{yr}$	$Q_{Cuenca} = 9.1818 \frac{m^3}{s}$	
Caudal contaminado que ingresa a la superficie al sistema	$Q_{Cont_L.S} = 220898.48 \frac{m^3}{yr}$	$Q_{Cont_L.S} = 0.007 \frac{m^3}{s}$	
Evapotranspiración Real (evaporación+transpiración)	$ETR_{Cuenca} = 203220291.89 \frac{m^3}{yr}$		$ETR_{Cuenca} = 6.44 \frac{m^3}{s}$
Escorrentía	$S = 35995405 \frac{m^3}{yr}$		$S = 1.14 \frac{m^3}{s}$
Dotación Bruta	$D_{Bruta} := \frac{D_{Neta}}{(1 - Per_{Teoricas})}$ $D_{Bruta} = 153.85 \frac{L}{hab \cdot day}$		
Consumo Directo de agua lluvia	$Q_{Consumo_Directo} := Poblacion_{Cons_Directo} \cdot D_{Bruta}$ $Q_{Consumo_Directo} = 11238.22 \frac{m^3}{yr}$		$Q_{Consumo_Directo} = 0.00036 \frac{m^3}{s}$
Infiltración para la recarga	$I_R = 51704152 \frac{m^3}{yr}$		$I_R = 1.63844 \frac{m^3}{s}$

Descripción	Calculos	Entradas (I)	Salidas (E)
Caudal contaminado de la superficie al subsuelo por infiltración	$Q_{Cont_Sup_Sub} := Q_{Cont_L_S}$ $Q_{Cont_Sup_Sub} = 220898.48 \frac{m^3}{yr}$		$Q_{Cont_Sup_Sub} = 0.007 \frac{m^3}{s}$
*Análisis PTAP de agua Alterna para abastecimiento			
Perdidas de la planta de aguas alternas que ingresan a superficie	$Q_{Perdidas_PTAP_Sup} := Q_{AA} \cdot P_{AA_Sup}$ $Q_{Perdidas_PTAP_Sup} = 757240 \frac{m^3}{yr}$		$Q_{Perdidas_PTAP_Sup} = 0.024 \frac{m^3}{s}$
Perdidas PTAP aportes adicionales que van al sistema de drenaje	$Q_{Perdidas_PTAP_A_Dre} := Q_{AA} \cdot P_{AA_Drenaje}$ $Q_{Perdidas_PTAP_A_Dre} = 1767187.85 \frac{m^3}{yr}$		
	$Q_{AA_Distribuido} := Q_{AA} - Q_{Perdidas_PTAP_Sup} - Q_{Perdidas_PTAP_A_Dre}$ $Q_{AA_Distribuido} = 6311511.42 \frac{m^3}{yr} \quad Q_{AA_Distribuido} = 0.2 \frac{m^3}{s}$		
*Análisis PTAP de agua proveniente de acuífero			
Perdidas de la planta de aguas subterráneas que ingresan a suelo	$Q_{Pozos_perdidas} := Q_{Extraido_Pozos} \cdot P_P$ $Q_{Pozos_perdidas} = 114736.1 \frac{m^3}{yr}$ $Q_{Pozos_Distribuido} := Q_{Extraido_Pozos} - Q_{Pozos_perdidas}$		
	$Q_{L_Poblacion} := Q_{E_P_Sin_Tratamiento} + Q_{Consumo_Directo} + Q_{AA_Distribuido} + Q_{Pozos_Distribuido}$ $Q_{Pozos_Distribuido} = 2179985.9 \frac{m^3}{yr}$		
*Análisis parcial Proceso Población			
Caudal requeridos para atender demanda de caudal de la población	$Q_{Requerido} := Poblacion \cdot D_{Neta}$ $Q_{Requerido} = 8765812.77 \frac{m^3}{yr}$ $Q_{Requerido} = 0.28 \frac{m^3}{s}$		
Cálculo de caudal retornado a la superficie por la población			
	$Q_{Ret_Pob_Sup} := Q_{L_Poblacion} \cdot P_{Agua_Retorno_superficie}$ $Q_{Ret_Pob_Sup} = 425294.56 \frac{m^3}{yr}$		$Q_{Ret_Pob_Sup} = 0.01348 \frac{m^3}{s}$
Balance de masas en el proceso No. 1			
	$\Sigma Ingreso_{Proceso_1} := Q_{Cuenca} + Q_{Cont_L_S} + Q_{Perdidas_PTAP_Sup} + Q_{Ret_Pob_Sup} = 9.2263 \frac{m^3}{s}$		
	$\Sigma Egresos_{Proceso_1} := ETR_{Cuenca} + S + Q_{Consumo_Directo} + I_R + Q_{Cont_Sup_Sub} = 9.2262 \frac{m^3}{s}$		
	$Balance_P1 := \Sigma Ingreso_{Proceso_1} - \Sigma Egresos_{Proceso_1} = 0.00002 \frac{m^3}{s}$		

Se destaca que del total de la cuenca el 20.1% de área es de recarga, lo cual permite trabajos de gobernanza en pro de la protección del acuífero, como por ejemplo adquisición de tierras, proyectos futuros de recarga gestionada, reforestaciones, entre otras. Así mismo, se establece que las aguas subterráneas aportan el 25% del caudal suministrado en la zona estudiada del acuífero, y principal beneficiario del mismo. En la tabla 18 se muestran los datos de caudal para el estado actual del acuífero.

Tabla 18*Caudales relevantes Tunja I*

Id	Descripción	Q (m ³ /s)
1	Requerido para la población	0,27778
2	Suministrado a la población	0,26954
3	Extraído por medio de pozos profundos	0,07272
4	Aportado por Otras Fuentes	0,28000
5	Contaminación varias fuentes	0,00246
6	Recarga por infiltración (natural)	1,63844
7	Recarga Gestionada	-
8	Almacenamiento	1,56

Figura 59*Diagrama de Barras Caudales Relevantes Tunja I*

La contaminación en el acuífero va creciendo y aunque poco notable en el modelo, por ello es necesario su control y prevención especialmente en lo referente a aceites y químicos usados en la agricultura.

En la metodología desarrollada en Mathcad a partir de la tabla 19 se muestra resumen y grafico del balance de cada uno de los procesos en la Figura 60.

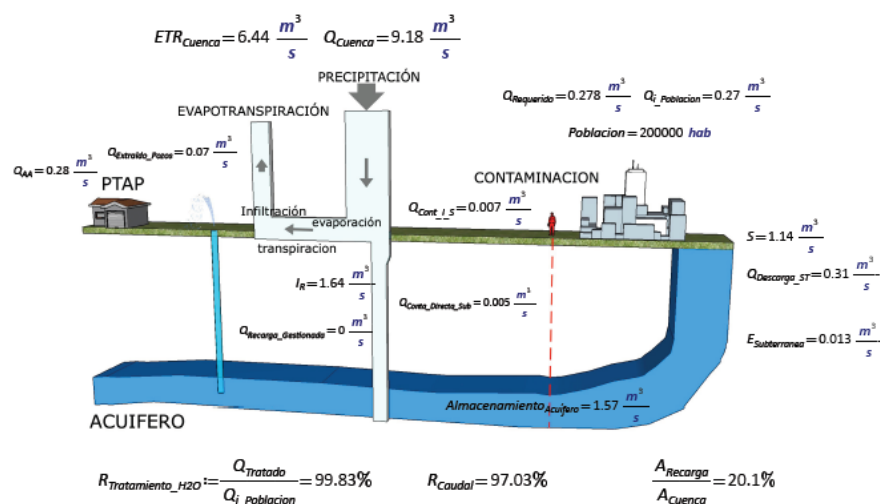
Tabla 19

Volumen de flujo en Tunja 2021

Flujo	Nombre del Flujo	Volumen del flujo
F1_Sup-Pob	Consumo Directo de agua lluvia	0.0004 m ³ /s
F10_Acu-Po	Extracción SIN tratamiento	0.0001 m ³ /s
F11_Ac-PA	Extracción para tratamiento	0.07272 m ³ /s
F12_PA-Pob	Distribución Acuífero	0.06908 m ³ /s
F13_PTA-Po	Distribución AA	0.2 m ³ /s
F14_PTA-PR	Perdidas SA	0.056 m ³ /s
F15_Po-FS	Distribución a usuarios FS	9E-05 m ³ /s
F16_Po-PR	Redes de Alcantarillado	0.25328 m ³ /s
F17_FS-PTR	PS a Colector	4.5E-05 m ³ /s
F2_Sup-Sub	Infiltración	1.63844 m ³ /s
F3_Con_inf	Contaminación infiltrada Superficie Suelo	0.007 m ³ /s
F4_Po-Sub	Retorno_P_S	0.01348 m ³ /s
F5_PTA_Sup	Perdidas PTAP a Superficie	0.024 m ³ /s
F6_Sub-Acu	Recarga	1.63844 m ³ /s
F7_ConS_A	Contaminación Sub-Acuífero	0.00241 m ³ /s
F8_PTA-Sub	Perdidas PTAP extraída a Subsuelo	0.003636 m ³ /s
F9_FS-Acu	Contaminación FS a Acuífero	4.45E-05 m ³ /s
I1_Precipi	Precipitación	9.1818 m ³ /s
I2_Con_Sup	Contaminación superficie	0.007 m ³ /s
I3_Con_Sub	Contaminación al subsuelo	0.005 m ³ /s
I4_ApAdici	Aportes Adicionales	0.28 m ³ /s
I5_RA	Recarga Artificial	0 m ³ /s
S1_Evapo	Evapotranspiración	6.44 m ³ /s
S2_Esc_Sup	Escorrentía Superficial	1.14 m ³ /s
S3_Esc_Sub	Escorrentía Subterránea	0.01322 m ³ /s
S4_Po_Rec	Descarga directa de aguas servidas CR	0.002695 m ³ /s
S5_De_PTAR	Descarga Cuerpo Receptor	0.30932 m ³ /s

Figura 60

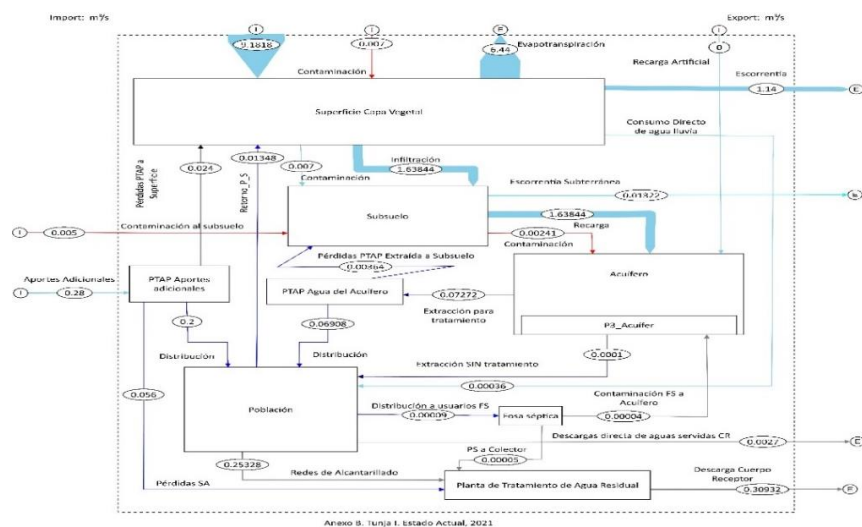
Balance General Tunja I



Con los datos obtenidos se ingresa al siguiente componente de la metodología apoyados el software Stan, en el cual ilustra y constata el balance de masas previamente obtenido. Mostrando (Figura 61) gráficamente el orden de magnitudes de los flujos presentes en el sistema, con la convención de colores establecida en la figura 53.

Figura 61

Diagrama de Flujo Tunja 2021

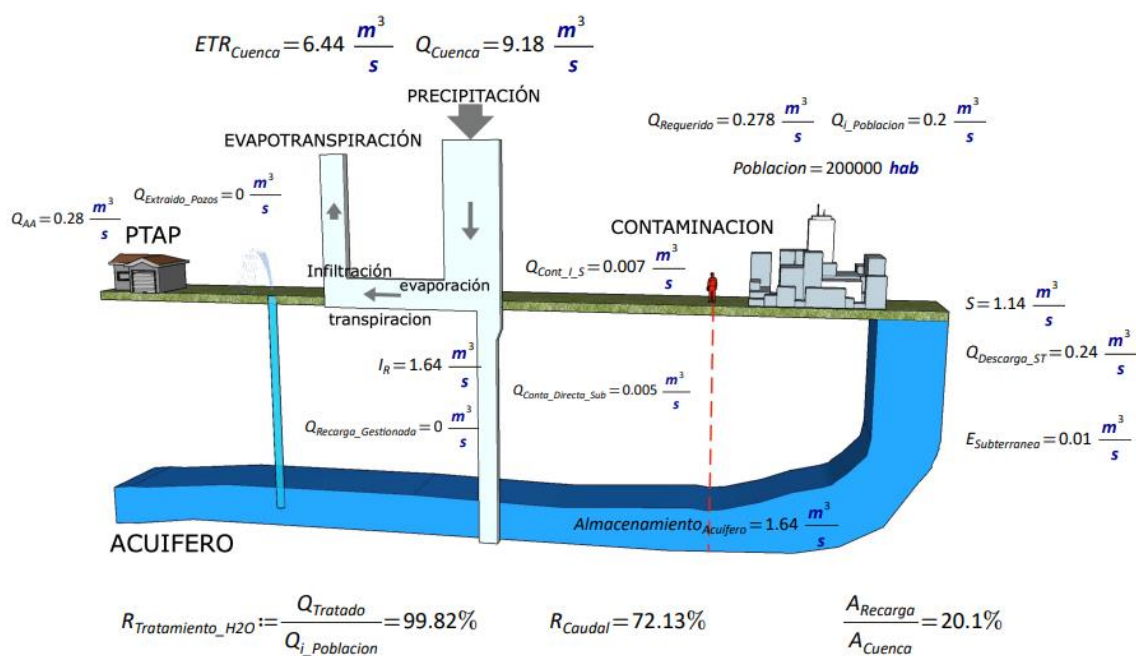


7.2.2 Acuífero Sector Tunja 2021- II. Únicamente Aportes Externos

Se evalúo el sistema sin tener en cuenta la extracción del acuífero para el abastecimiento de la población mostrado en Figura 62, de donde se puede concluir que la cantidad de agua que ingresa es insuficiente para los habitantes de la zona y toda la infiltración se considera como almacenamiento.

Figura 62

Balance General Tunja II



Con la aplicación de la metodología se establece que el caudal traído del embalse Teatinos cubre las necesidades de 144 mil habitantes (72%), sumado a esto el suministro de agua potabilizada está cercana al 100% lo cual genera confianza a los usuarios, los resultados de caudales para este escenario se muestran en Tabla 20.

Tabla 20

Caudales relevantes Tunja II

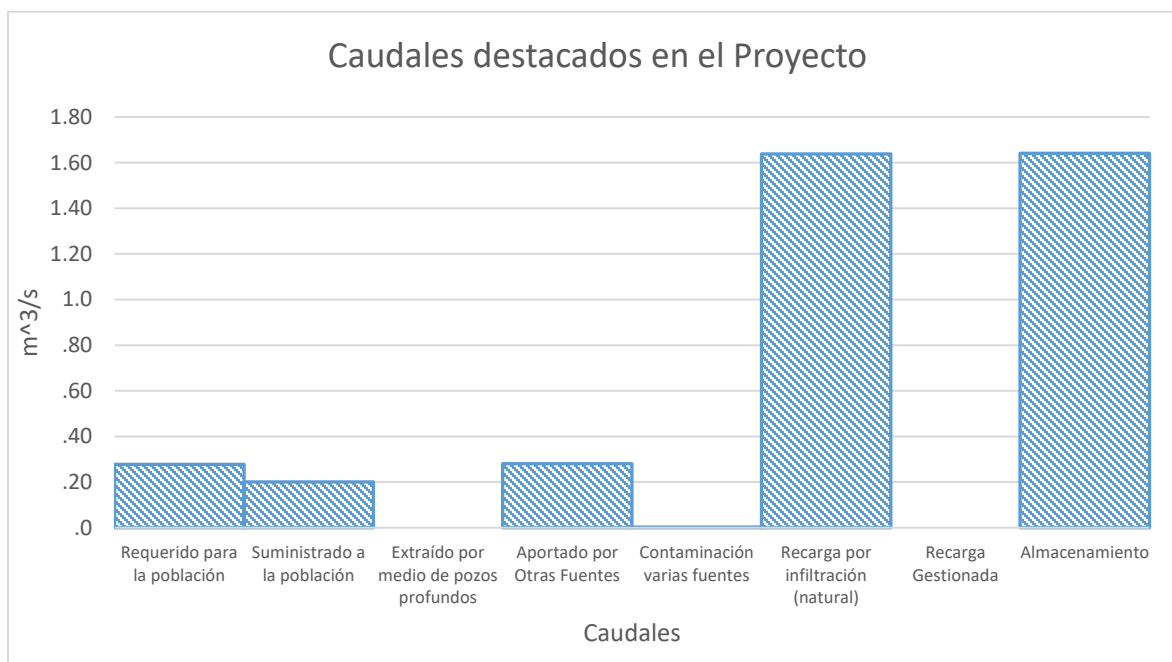
Id	Descripción	Q (m³/s)
1	Requerido para la población	0,27778
2	Suministrado a la población	0,20036
3	Extraído por medio de pozos profundos	-

Id	Descripción	Q (m ³ /s)
4	Aportado por Otras Fuentes	0,28000
5	Contaminación varias fuentes	0,00246
6	Recarga por infiltración (natural)	1,63844
7	Recarga Gestionada	-
8	Almacenamiento	1,64090

En el escenario de no explotar las aguas subterráneas toda se infiltrada, por ende se almacena dentro del acuífero para uso futuro, también como en el caso I, se evidencia que lo requerido por la población según la dotación neta sugerida en la reglamentación, es superior a la capacidad del sistema, la representación de caudales actuando en el sistema se observan en la Figura 63.

Figura 63

Diagrama de Barras Caudales Relevantes Tunja II



El caudal captado sin pérdidas es suficiente para la población, por tanto, una inversión en detección de fugas, mejoramiento de redes y plantas de tratamiento, impactarían de forma positiva al sistema.

7.2.3 Acuífero Sector Tunja 2021- III. Situación Crítica

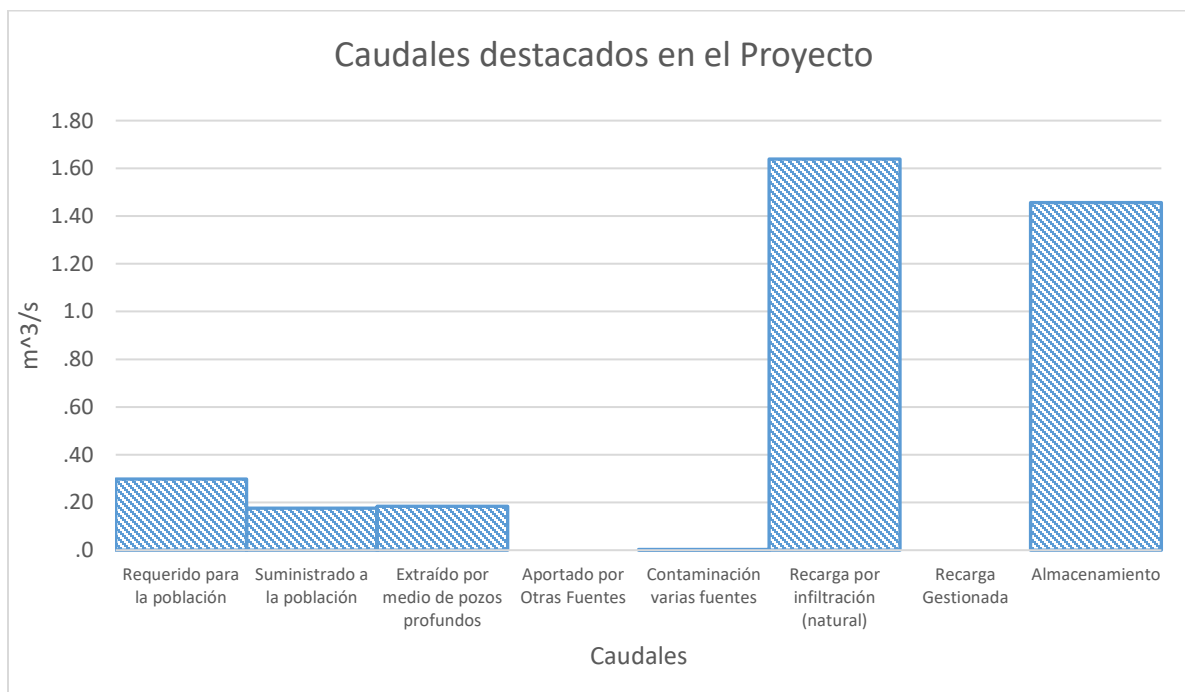
En la condición crítica se dará, en el caso hipotético que la población se incremente por presencia de más estudiantes (para el modelo matemático establecida en 15 mil) y existe alguna falla en sistema de conducción del embalse Teatinos a la planta de tratamiento que impidiera la entrada de agua.

Ante tal situación la alternativa de la empresa prestadora será utilizar el caudal máximo aprobado en la explotación de los pozos profundos, en tanto buscan entradas adicionales como en bloque o una tercera fuente.

En dicho modelamiento matemático (observar Anexo 4) el caudal de los pozos profundo soluciona la necesidad del 58% de la población, pero almacenamiento sufriría algunas consecuencias superables con un adecuado control, si la emergencia no se acentúa en el tiempo. En la figura 64 se muestra los caudales significativos del escenario modelado.

Figura 64

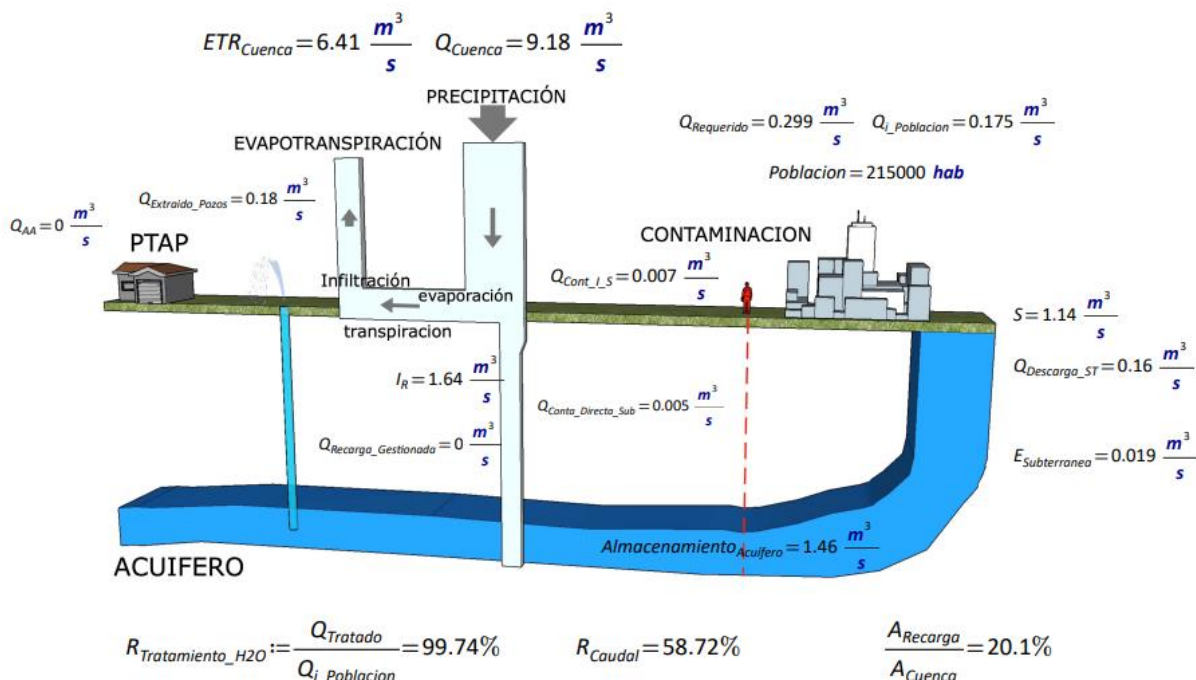
Diagrama de Barras Caudales Relevantes Tunja III



En conclusión, en caso de una situación crítica como la enunciada se requiere solucionar el abastecimiento de agua al 42% de la población con otra fuente, dado que la suministrada por los pozos profundos a toda su capacidad cubriría solamente el 58%, como se muestra en la figura 65.

Figura 65

Balance General Tunja II



7.2.4 Análisis Acuífero San Andrés- I. Situación Actual

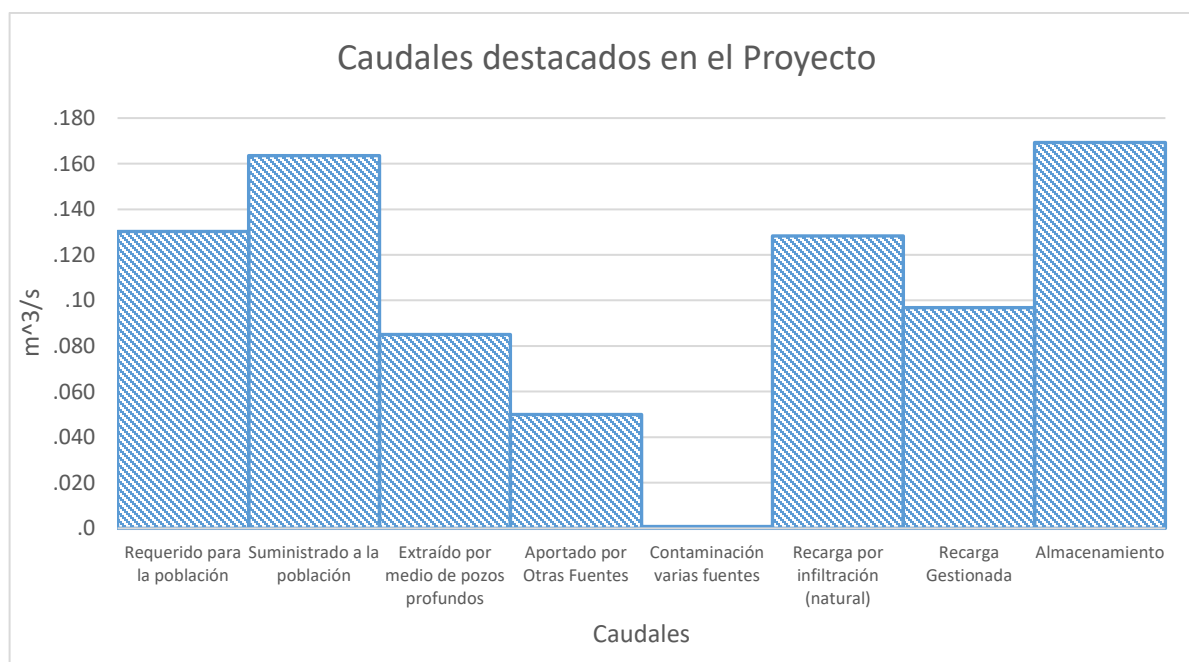
La principal fuente de agua de la isla como se mencionó previamente es el acuífero, en la evaluación se determinó, que con ayuda de las plantas desalinizadoras y recolección directa de aguas lluvias logra suministrar el líquido a la totalidad de la población, logrando un excedente, pero, cabe aclarar que esa situación tuvo en cuenta solamente la proyección DANE para 2020, excluyendo personas en con presencia de irregularidad y aumento de turistas en el territorio.

Se destaca las deficiencias en redes de alcantarillados, la poca cobertura en el servicio de acueducto que tiene a la isla abocada a una problemática sentida de comunidad.

El caudal extraído de los pozos profundos sobrepasa el suministrado por otros medios, lo cual indica que el sistema es dependiente de la precipitación y recarga de su acuífero, por ello, cualquier decisión en su intervención impacta el suministro. En la Figura 66 se muestra los caudales obtenidos en la modelación de este escenario.

Figura 66

Diagrama de Barras Caudales Relevantes San Andrés I



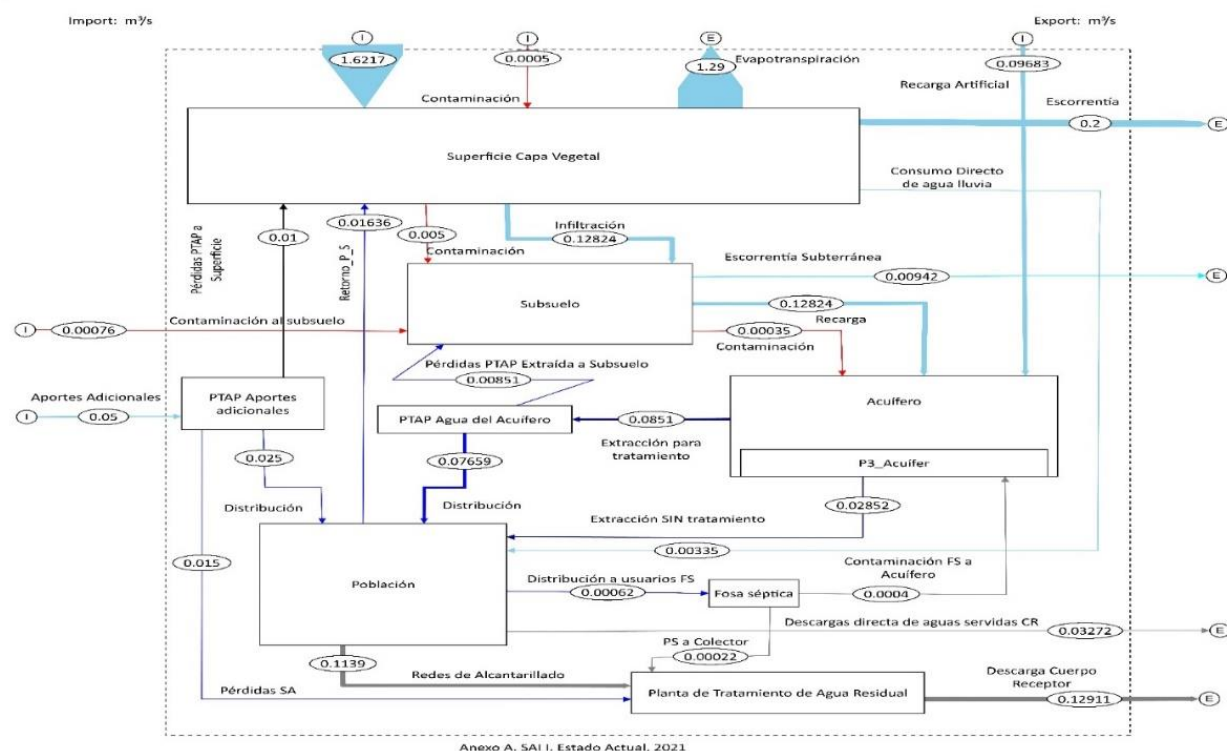
Se determina que el caudal suministrado a la población está por el orden de los $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$, que la contaminación en magnitud aun es baja, sin embargo, la intrusión marina en la isla sigue siendo una amenaza.

En esta hipótesis se considera la recarga gestionada proyectada según los diseños, la cual llega a ser superior a la extraída, haciendo relevante la implementación de este tipo de infraestructuras que permite acelerar el proceso normal de infiltración, permitiendo que para ese caso en un término de dos años se cuente con mayor disponibilidad.

En lo referente almacenamiento del recurso es notorio el impacto de la recarga gestionada, de no contar con esta el acuífero se ve afectado severamente. En la Figura 67 se percibe la deficiencia la cobertura del sistema de acueducto para satisfacer al total de la población, encontrando que alrededor del 38% no tienen servicio de agua potable.

Figura 67

Diagrama de flujo y procesos San Andrés



7.2.5 Análisis Acuífero San Andrés- II. Situación Crítica

En este escenario se consideró años secos, con algunas lluvias torrenciales en cortos periodos de tiempo por lo tanto la infiltración mínima de 255mm/año, una recarga gestionada con el caudal propuesto para tres meses al año y la población incrementada en 40 mil personas. Los datos obtenidos de caudales se muestran en la Tabla 21 y el resultado grafico del sistema en la Figura 68, la totalidad del modelo se evidencia en el Anexo 6, resaltando que la cobertura del servicio de agua baja al 91%, la potabilización

y/o tratamiento está en el 56% y la recarga de forma artificial es aproximadamente el 50% de la extraída.

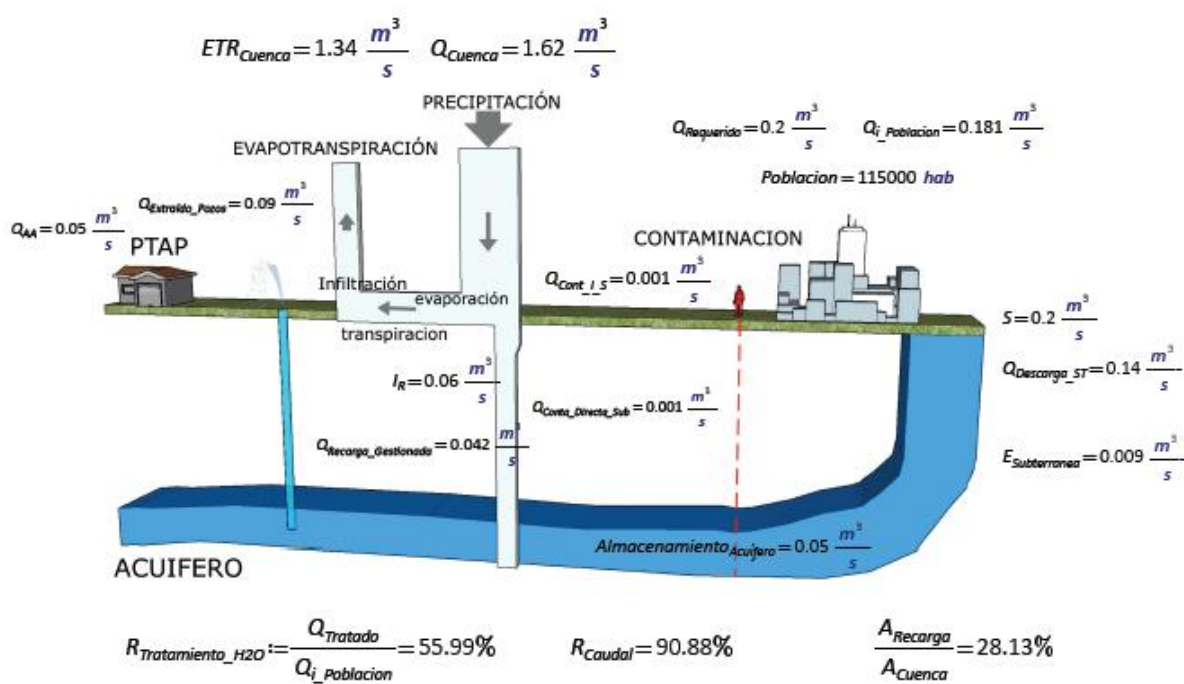
Tabla 21

Caudales relevantes San Andrés II

Id	Descripción	Q (m ³ /s)
1	Requerido para la población	0,19965
2	Suministrado a la población	0,18145
3	Extraído por medio de pozos profundos	0,08510
4	Aportado por Otras Fuentes	0,05000
5	Contaminación varias fuentes	0,00076
6	Recarga por infiltración (natural)	0,06141
7	Recarga Gestionada	0,04150
8	Almacenamiento	0,04709

Figura 68

Balance General San Andrés I



7.2.6 Proyecciones de comportamiento 2040 -2100

Con el fin de simplificar el modelo se considera pérdidas del 5%, garantizar cubrir con el servicio al 100% de la población manteniendo los porcentajes entre las aguas subterráneas y las provenientes de adiciones establecidos en el año 2020 y que todas las aguas servidas serán conducidas y tratadas por los sistemas.

Así mismo, la explotación del acuífero al máximo permitido para mantener la relación de almacenamiento y aguas adicionadas; consumos controlados y suministrados por los sistemas de acueducto y alcantarillado y no se considera contaminación en ningún proceso.

Las anteriores consideraciones se hacen proyectando la intervención de los sistemas a favor de la comunidad y de la sostenibilidad del recurso, con controles de baja contaminación e impermeabilidad de las áreas para mantener la infiltración.

Proyección Sistema Acuífero de Tunja 2040-2100. En la Tabla 22 se muestra consideraciones para el sistema según el año proyectado, con los valores de a las principales variables presentes, cabe señalar que la totalidad del escenario modelado es mostrado en Anexo 7.

Tabla 22

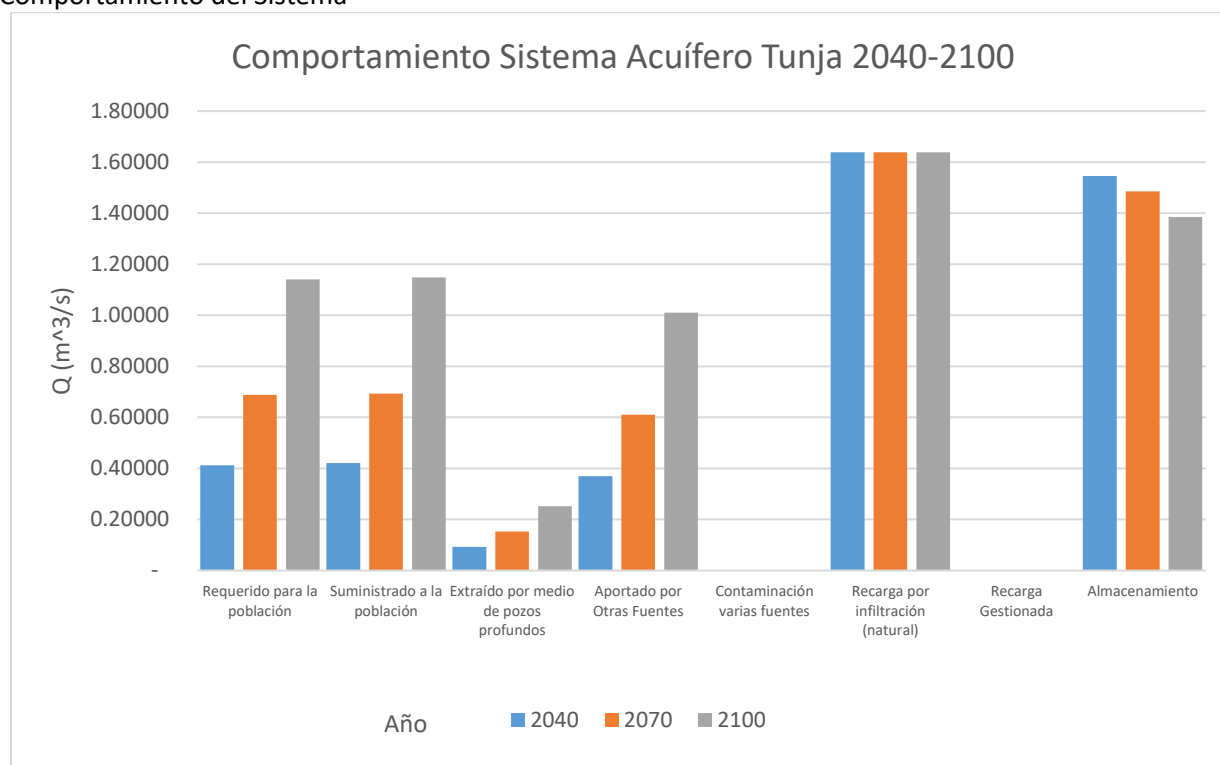
Consideraciones en la proyección de Sistema de Acuífero de Tunja

Descripción	Año	Cantidad	Unidad
Precipitación	2020	775,00	mm/año
Temperatura		13,20	°C
Población		200.000,00	habitantes
Fracción utilizada del Acuífero		25	%
Precipitación	2040	820,26	mm/año
Temperatura		14,00	°C
Población		297.000,00	habitantes
Precipitación	2070	850,53	mm/año
Temperatura		15,60	°C
Población		495.234,26	habitantes
Precipitación	2100	877,66	mm/año
Temperatura		18,00	°C
Población		821.953,47	habitantes

El sistema resumido en Figura 69 tiene la capacidad de abastecer a la cuarta parte de la comunidad independiente de su crecimiento, como caso significativo se resalta en la proyección aumento en las precipitaciones en la zona, pese al incremento de temperatura que perjudica en mayor sentido algunas poblaciones.

Figura 69

Comportamiento del Sistema



Los resultados son optimistas para el sistema acuífero de Tunja, pero no se puede descuidar su cuidado y control sostenible, en las Figuras 70 a 72 se muestra los escenarios para los años 2040, 2070 y 2100.

Donde se determina que en el escenario del año 2040 para una población de 300 mil habitantes se podría explotar $0.093 \text{ m}^3/\text{s}$ del acuífero garantizando el almacenamiento y adecuado comportamiento. Para el 2070 con una población de 500 mil habitantes se podría explotar $0.153 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 70

Balance General Tunja IV-Año 2040

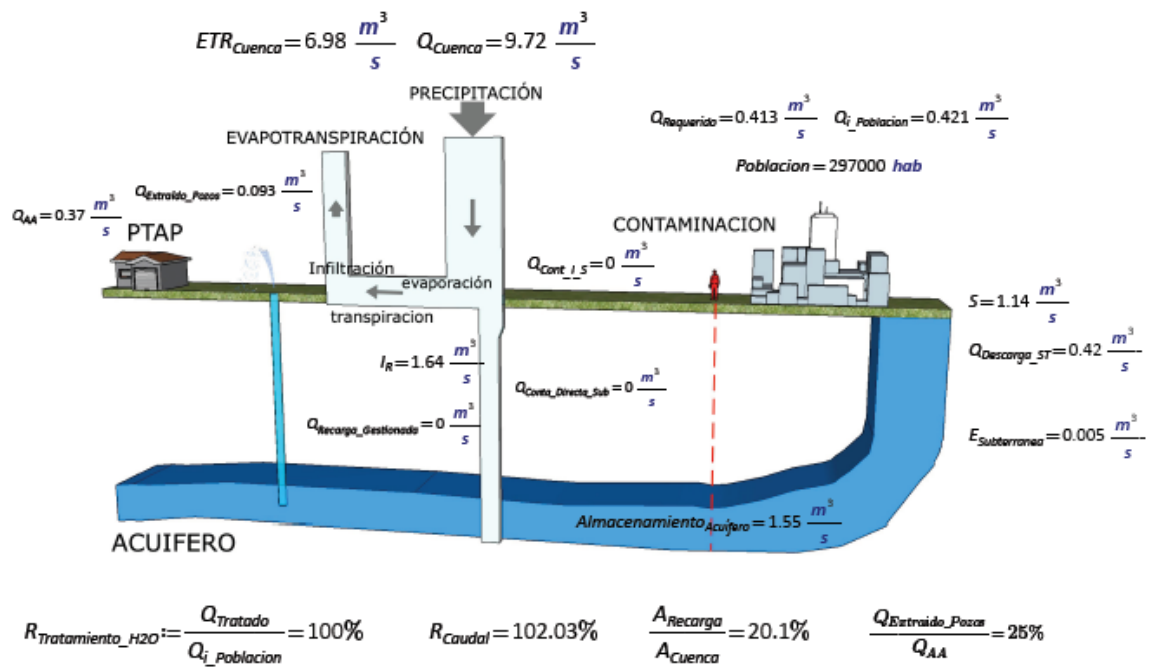


Figura 71

Balance General Tunja IV-Año 2070

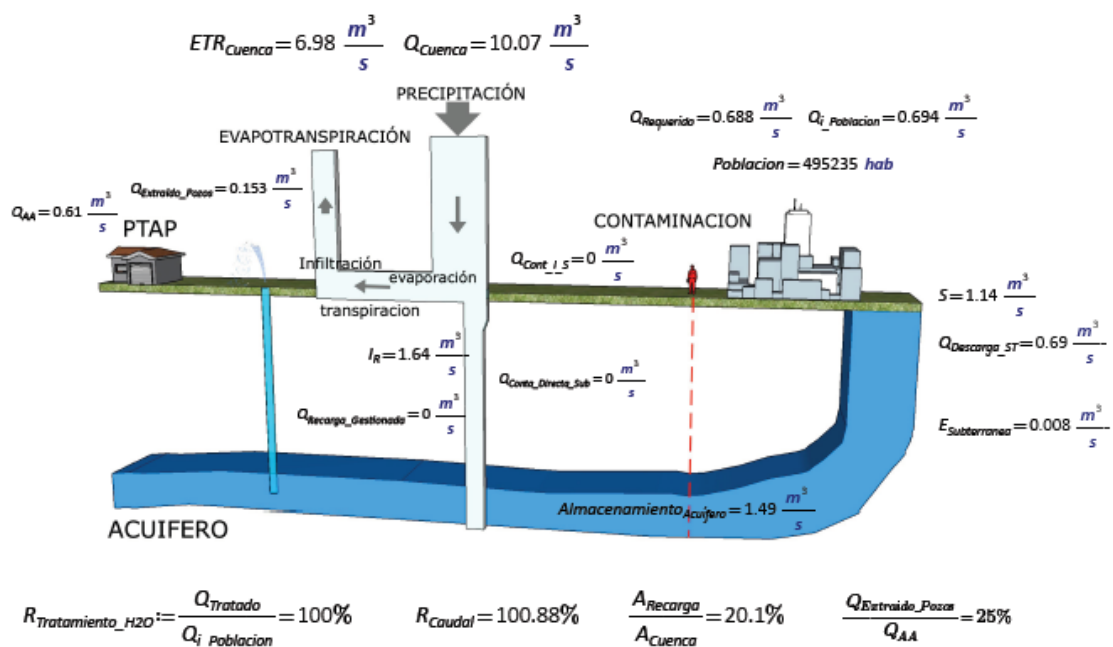
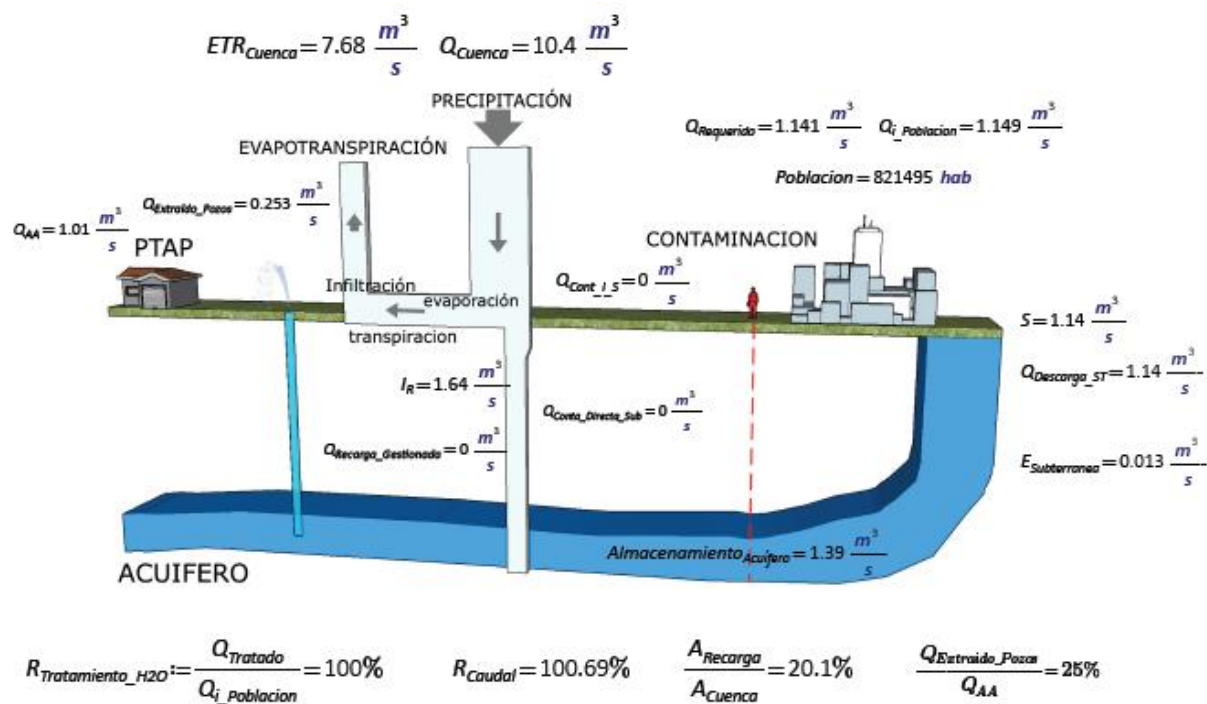


Figura 72

Balance General Tunja IV-Año 2100



Nota. Para una población de 820 mil habitantes se podría explotar 0.25m³/s del acuífero garantizando el almacenamiento y adecuado comportamiento, pese a una leve disminución.

Proyección Sistema Acuífero de SAI 2040-2100. En la Tabla 233 se muestra consideraciones de cada variable principal para el año proyectado y en la 24 los resultados relevantes de caudal para el año analizado.

Tabla 23

Consideraciones en la proyección de Acuífero de SAI

Descripción	Año	Cantidad	Unidad
Precipitación	2020	1.894,00	mm/año
Temperatura		26,00	°C
Población		74.466,00	habitantes
Relación utilizada del Acuífero con aportes adicionales		223,00	%
Precipitación	2040	1.287,92	mm/año
Temperatura		26,80	°C
Población		87.952,00	habitantes
Precipitación	2070	865,74	mm/año
Temperatura		28,20	°C

Descripción	Año	Cantidad	Unidad
Población		112.150,00	habitantes
Precipitación	2100	579,96	mm/año
Temperatura		30,20	°C
Población		142.887,00	habitantes

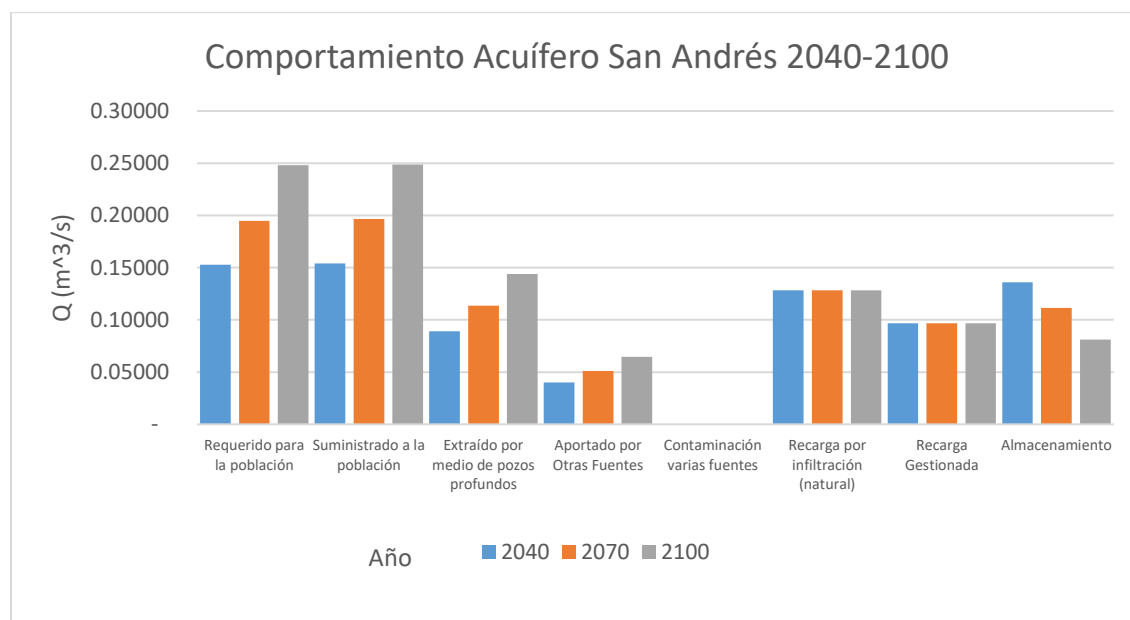
Tabla 24

Comparación de proyección de Acuífero de SAI

Id	Descripción	2040	2070	2100	Unidad
1	Requerido para la población	0.15269	0.19470	0.24807	m3/s
2	Suministrado a la población	0.15413	0.19652	0.24889	m3/s
3	Extraído por medio de pozos profundos	0.08920	0.11373	0.14384	m3/s
4	Aportado por Otras Fuentes	0.04000	0.05100	0.06450	m3/s
5	Contaminación varias fuentes	-	-	-	m3/s
6	Recarga por infiltración (natural)	0.12824	0.12824	0.12824	m3/s
7	Recarga Gestionada	0.09683	0.09683	0.09683	m3/s
8	Almacenamiento	0.13588	0.11135	0.08124	m3/s

Figura 73

Comportamiento del Sistema



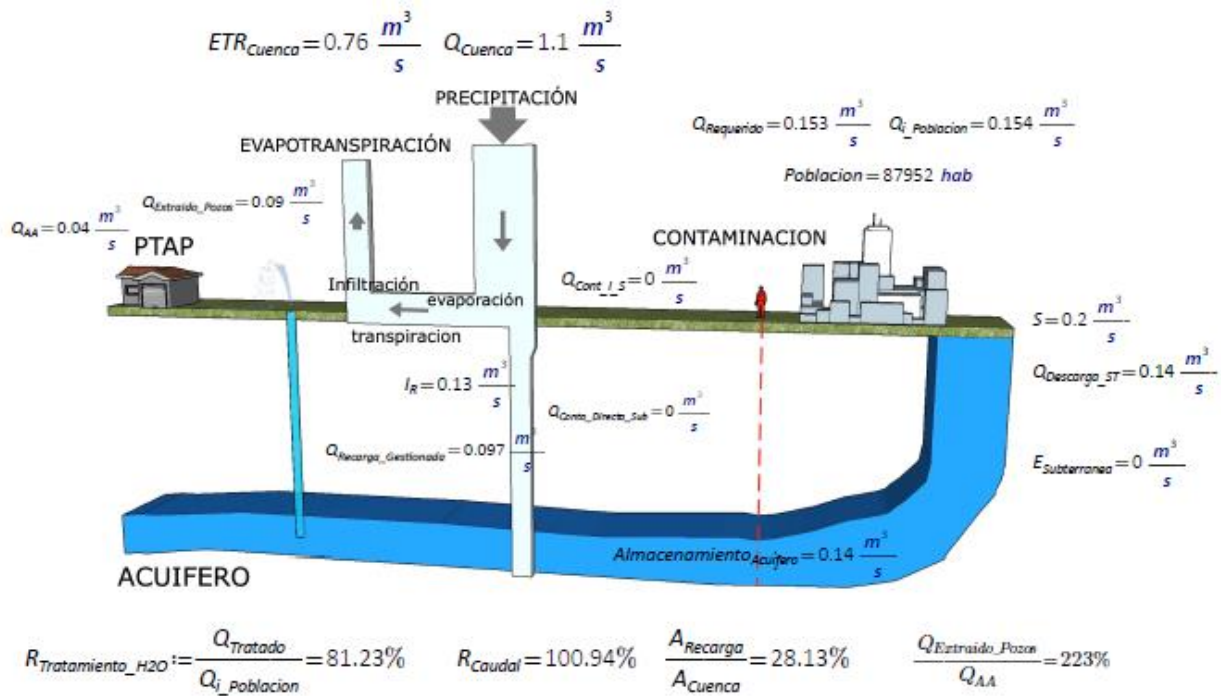
La situación de San Andrés es complicada para lograr un adecuado manejo del acuífero, es indispensable un control de explotación, buscar nuevas alternativas de potabilización de agua de mar (desalinización), donde se disminuya el caudal extraído de los pozos.

Con el recurso existente es posible mantener la población a 2040, realizando los ajustes a las redes y optimizando los sistemas.

Pero el aumento de la población y efectos del cambio climático ocasionado por disminución en la precipitación e incremento de temperatura, el sistema ingresa en un estrés hídrico con la disminución del almacenamiento de forma notable y tener tanta explotación de sus aguas.

Figura 74

Balance General San Andrés III-Año 2040



Nota. Con un caudal total de $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ se suministra agua potable a 88 mil habitantes en la isla, apoyados con las recolecciones de la lluvia que por tradición realiza la comunidad Sanandresana.

Figura 75

Balance General San Andrés IV-Año 2070

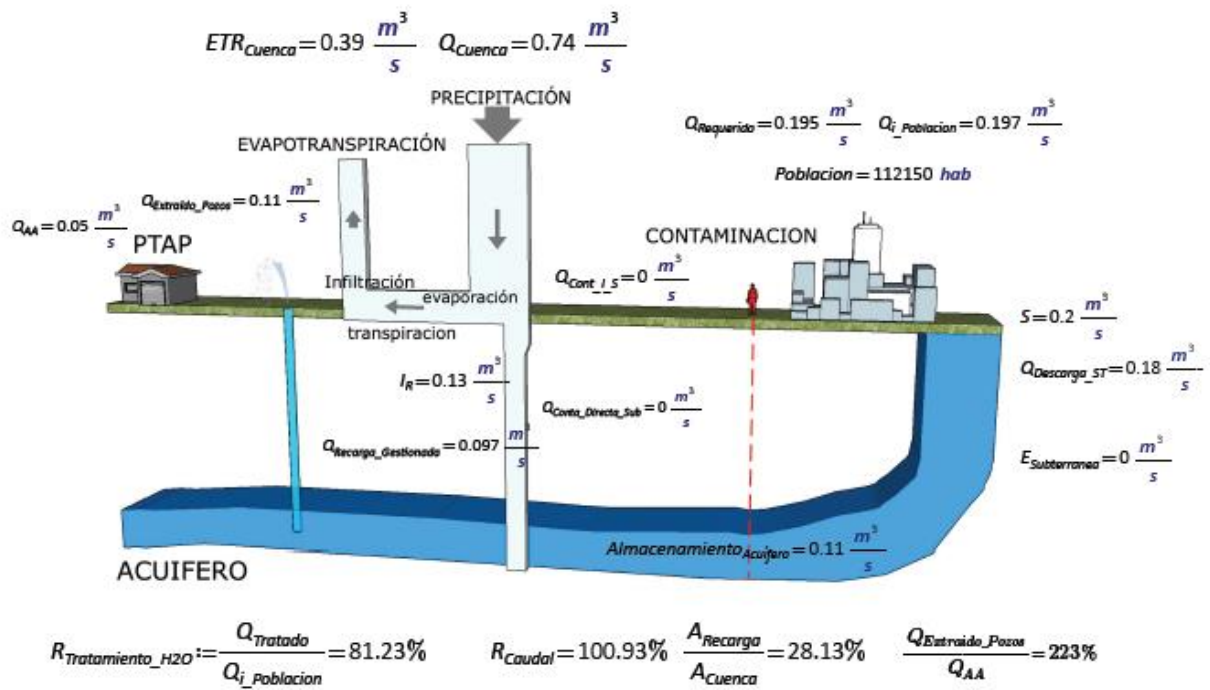
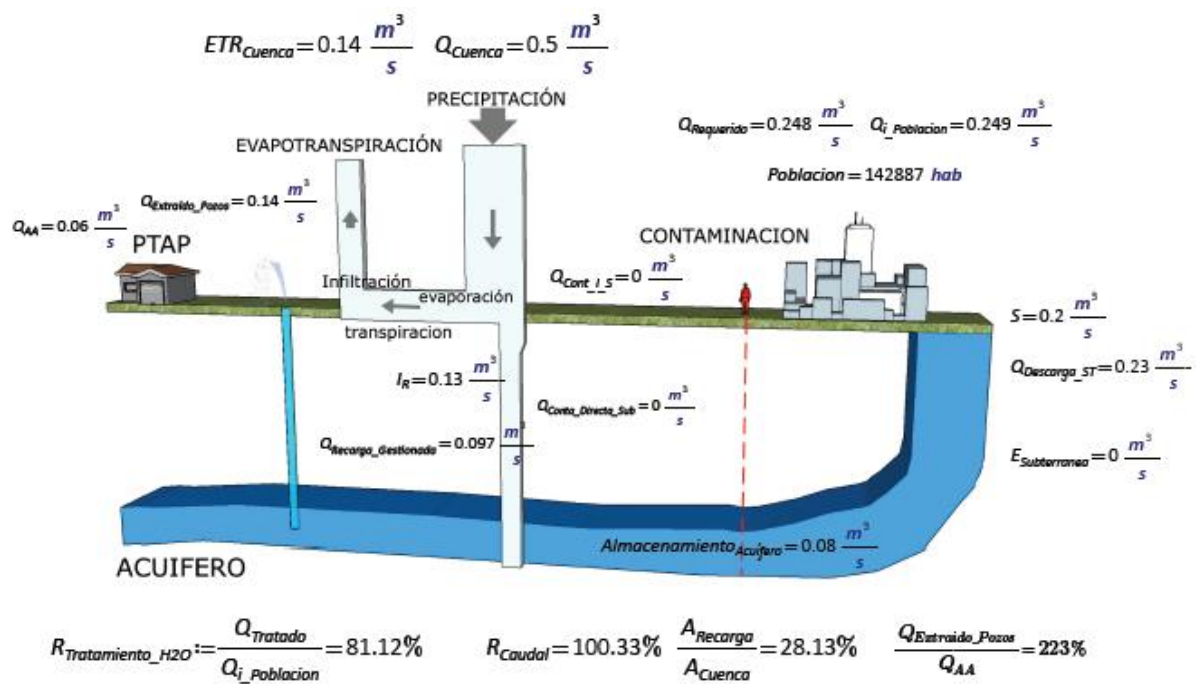


Figura 76

Balance General San Andrés V-Año 2100



Conclusiones

Es indispensable la planeación, cuidado, buen manejo y conservación de los recursos hídricos subterráneos ya que para el futuro serán las fuentes de disponibilidad de agua potable, así mismo prioritaria en la concepción de infraestructura y legislación, que garantice la sostenibilidad en el tiempo de las aguas subterráneas tanto para consumo humano como para la agricultura e industria.

En la actualidad y encontrándonos en un mundo donde las necesidades apremian, con aumento creciente de la población a nivel mundial, hacemos un exagerado uso de los recursos naturales, generando contaminación y estrés a constante los sistemas.

Es necesario una adecuada planificación urbana y rural que busque mitigar los riesgos y la distribución del recurso en todos los grupos poblacionales, realizando infraestructuras verdes acordes a las situaciones, respetando los ciclos de la naturaleza, utilizando energías limpias e innovadoras y principalmente educando a la población sobre adecuado manejo del agua y la necesidad que éste tiene para futuras generaciones.

Si bien este trabajo aporta conocimientos en materia de agua subterránea, amplía un campo de discusión sobre las acciones gubernamentales y sociales en bienestar de los recursos hídricos y nuevos campos de estudio e investigación para su conocimiento y evaluación.

Se determinó que los acuíferos analizados están expuestos a una sobreexplotación creando traumatismos que a futuro traerá consecuencias dramáticas. Por lo que se hace necesario controlar los aumentos de contaminación en los sistemas de aguas profundas, para el caso de Tunja la agricultura y talleres y para San Andrés la intrusión marina principalmente.

El sistema de tratamiento de agua potable que brinda en Tunja y sus alrededores es óptimo y con una cobertura superior al 98% de la población, condición que no sucede en San Andrés donde este beneficio solo lo tiene el 60% de los habitantes.

Sistema de Acuífero Tunja

Para el caso puntual se tenían estudios de estrés hídrico y sobreexplotación hasta el año 2005, lo anterior ha ido cambiando de forma positiva y en el momento se tiene un almacenamiento de la recarga, debido al adecuado manejo por parte de las instituciones en la extracción.

El suministro de agua a la zona de Tunja está al límite y no es recomendable utilizar solamente el acuífero en caso de emergencia extrema, ante esa situación la alternativa de la empresa prestadora utilizará el caudal máximo aprobado en la explotación de los pozos profundos, en tanto buscan entradas adicionales como en bloque y/o gravedad de la represa La Copa.

Las aguas subterráneas aportan el 25% del caudal suministrado, y la capacidad del acuífero de Tunja garantiza el suministro casi al 60% de la población utilizando el caudal máximo autorizado de explotación, sin embargo, el almacenamiento sufriría algunas consecuencias.

Es conveniente acelerar la búsqueda y construcción de un tercer sistema de abastecimiento de agua para la ciudad de Tunja, con ello evitar mayores consumos del agua subterránea.

Se aprecia que el caudal traído del embalse Teatinos cubre las necesidades de 144 mil habitantes (72%), sumado a esto el suministro de agua potabilizada está cercana al 100% lo cual genera confianza a los usuarios. Los resultados de las proyecciones son optimistas para el sistema acuífero de Tunja, pero no se puede descuidar su cuidado y control sostenible.

Acuífero San Andrés

En San Andrés se puso en marcha un proyecto de recarga gestionada del acuífero, el cual está brindando buenas soluciones a la necesidad de agua de la isla, sin embargo, se solicita establecer un seguimiento periódico y cuantificar el caudal realmente infiltrado por este medio durante el año, mediante mecanismos electrónicos, trazadores, pozos testigos principalmente.

El nivel de explotación del acuífero aumenta el riesgo de ingreso de agua de mar (intrusión marina) contaminando este fundamental y casi único sistema de abastecimiento de agua potable.

El caudal extraído del acuífero San Andrés sobrepasa el suministrado por otros medios como plantas desalinizadoras y recolección directa del agua lluvia, lo cual indica que el sistema es dependiente de la precipitación y recarga de su acuífero, por ello, cualquier decisión en su intervención impacta el suministro a los habitantes de la isla.

Según las proyecciones la situación de San Andrés es complicada para lograr un adecuado manejo del agua subterránea, es indispensable un control de explotación, buscar nuevas alternativas de potabilización de agua de mar (desalinización), donde se disminuya el caudal extraído de los pozos, o por lo menos se mantenga.

Con el aumento de la población y efectos del cambio climático en cuanto a menor precipitación e incremento de la temperatura el sistema ingresa en un estrés hídrico al bajar el almacenamiento de forma notable y tener tanta explotación de sus aguas.

Metodología

Se realizó la evaluación del sistema de acuíferos de Tunja ubicado en el departamento de Boyacá y el de la Isla de San Andrés, en diferentes escenarios de explotación de las aguas subterráneas, entregando un análisis detallado en cada caso para la toma de decisiones.

Esta metodología puede ser aplicada en varios aspectos de los sistemas hídricos subterráneos tales como el consumo humano, modelación para la agricultura, la industria y demás.

Los dos componentes de la metodología se complementan ya que el primero es insumo que se ingresan en el segundo, permitiendo al usuario una magnitud real del sistema, posteriores análisis y toma de decisiones respecto al tema estudiado.

Los software utilizados garantizan agilidad, manejo de procesos internos, facilidad de modificación y ajuste dependiendo del sistema a evaluar, ayuda visual al usuario para la toma de decisiones, sin embargo la metodología propuesta, es posible la sistematización en Excel para ampliar su uso.

Recomendaciones

Se recomienda la validación de datos hidrológicos y de población de los acuíferos analizados para tener mayor certeza en los datos de salida.

Se recomienda proteger los acuíferos y realizar campañas de sensibilización a comunidades con el fin de dar a conocer los lugares y las formas con las que las ciudades se abastecen y de la importancia de su cuidado.

Para SAI ante esta perspectiva tan negativa para la población y para el medio ambiente, es necesario que las diferentes entidades del orden regional, nacional e internacional, busquen alternativas para contrarrestar tal situación, con fórmulas técnicas, invirtiendo en infraestructura y tecnología, aceptando políticas ecológicas, renovables, amigables con el ecosistema, maximizando proyectos para la recarga artificial de los acuíferos, instalación plantas desalinizadoras, campañas culturales a turistas, entre muchas más, que pueden ser analizadas en profundidad en beneficio de la comunidad, siendo punto de partida para el desarrollo de investigaciones.

Así mismo, tomar medidas para restringir o disminuir el ingreso de turistas en épocas de bajas precipitaciones, toda vez que la cantidad de agua dulce es insuficiente para los todos; las decisiones son difíciles por los impactos económicos y tienen implicaciones político administrativas fuertes.

Para el caso del sistema de acuíferos de Tunja se recomienda, continuar con el control sobre la explotación, cuidar las zonas de recarga y mantener el monitoreo constante.

Debemos crear conciencia y así entender que se debe ser más eficiente con la administración del agua.

La coordinación y el trabajo en equipo para el mismo fin entre los diferentes entes políticos, económicos y sociales a nivel mundial, garantizaran una adecuada distribución y cuidado del recurso hídrico, así como disminuir la pérdida de vidas humanas, enfermedades, previniendo guerras innecesarias. Todo esto se logrará únicamente con articulación y voluntad de las partes, con educación

en cada una de las etapas y a todos los grupos poblacionales enfatizando en la importancia del agua en la subsistencia de las especies.

Implementar los sistemas de recarga gestionada de acuíferos como cuidado y conservación del recurso.

El caudal captado independientemente si es superficial, subterráneo, o desalinizado es suficiente para las poblaciones analizadas, por ello, se recomienda la optimización de los sistemas en todas sus fases.

La metodología propuesta es de carácter intuitivo, simple, rápida, modificable y lógica que ayuda a tener una expectativa general de los procesos y del cambio del ciclo que se está evaluando, con ella se puede aplicar otras alternativas y a la vez utilizar software especializado donde evalúa componente por componente dando al usuario una idea del estado actual de su recurso en cada proceso.

Referencias

- ¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center. (s/f). Recuperado el 10 de abril de 2021, de <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Agua en el planeta – Agua.org.mx. (s/f). Recuperado el 6 de septiembre de 2021, de <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Alcaldía de Tunja. (2015). *Política Pública de la Juventud Municipio de Tunja*. Recuperado de <http://186.116.13.48/obsocial/documentos/POLITICA PUBLICA.pdf>
- ANA, A. N. del A. (2013). *Las aguas subterráneas de la región del Arco Seco y la importancia de su conservación*. Panama.
- Arévalo, L. A. P., & Joel Carrillo Rivera, J. (2012). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geograficas*, 81(81), 18–32. <https://doi.org/10.14350/rig.30518>
- Auge, M. P. (2006). *Agua Subterránea. Deterioro De Calidad Y Reserva*. 1–173.
- Avila Garcia, P., & Vivar Arenas, J. (2018). *La relacion agua y ciudad: una aproximación analítica*. 24.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, E. (2008). El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC. En *Library*. Ginebra.
- Bedoya, M., & Carmona, J. (2010). Modelo Numerico del Acuifero de la Isla de San Andrés, Colombia. XXIV *Congreso Latinoamericano de hidráulica Punta del Este, Uruguay*, 15.
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2016). Practical handbook of material flow analysis. En *Practical Handbook of Material Flow Analysis*.

- Cahuana, A., & Yugar, W. (2009). Material De Apoyo Didactico Para La Enseñanza Y Aprendizaje De La Asignatura De Hidrologia Civ-233. *Material De Apoyo Didactico Para La Enseñanza Y Aprendizaje De La Asignatura De Hidrologia Civ-233*, 414.
- Carmona, J., Poveda, G., Vélez, M. V., Bedoya, M., & Vélez, J. I. (2010). Caracterización de la climatología y los efectos del ENSO sobre la isla de San Andrés, Colombia. *XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA PUNTA DEL ESTE*, 11.
- Cencic, O., & Rechberger, H. (2008). Material Flow Analysis with Software STAN. *EnviroInfo 2008 - Environmental Informatics and Industrial Ecology*, 2008, 440–447.
- CEPAL. (2015). *La incertidumbre de los recursos hídricos y sus riesgos frente al cambio climático*. 82. <https://doi.org/CEPAL Serie Y Seminarios y Conferencias No 82>
- Chester, L. A., & Gibbons, C. J. (2007). *Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator*. (April 2012), 37–41.
- Collazo Caraballo, M. P., & Montaña Xavier, J. (2012). *Manual de Agua Subterránea*. <https://doi.org/978-9974-594-09-8>
- Comte, J. C., Cassidy, R., Obando, J., Robins, N., Ibrahim, K., Melchioly, S., ... Davies, J. (2016). Challenges in groundwater resource management in coastal aquifers of East Africa: Investigations and lessons learnt in the Comoros Islands, Kenya and Tanzania. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 5, 179–199. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.12.065>
- Coralina, C. para el D. S. del A. de S. A. P. y S. C. (2005). *Plan De Ordenación Y Manejo De La Cuenca El Cove*.
- Coralina, C. para el D. S. del A. de S. A. P. y S. C. (2009). *Plan de manejo de las aguas subterráneas 2000-2009*. 52.

Coralina, & Invemar. (2012). Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andrés" -INVEMAR- y Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de S. En *Serie de publicaciones especiales, Invema, No. 28, p. 180* (Vol. 28). Recuperado de <http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/10447AtlasSAISeaflower.pdf>

Corpoboyacá, C. A. R. de B. (2015). *Haz tuyo el acuífero*.

Corpoboyacá, & Hidroboyacá, C. (2015). *Informe de aprestamiento. Formular el Plan de Manejo del Sistema Acuífero de Tunja (cuenca alta del río Chicamocha), bajo el esquema de la estrategia de socialización y participación "haz tuyo el acuífero*.

Corpoboyacá, & Hidroboyacá, C. (2016a). Informe de diagnóstico. Formular el Plan de Manejo del Sistema Acuífero de Tunja (cuenca alta del río Chicamocha), bajo el esquema de la estrategia de socialización y participación "haz tuyo el acuífero. En *Journal of Chemical Information and Modeling*.

Corpoboyacá, & Hidroboyacá, C. (2016b). Informe de Formulación. Formular el Plan de Manejo del Sistema Acuífero de Tunja (cuenca alta del río Chicamocha), bajo el esquema de la estrategia de socialización y participación "haz tuyo el acuífero". En *Journal of Chemical Information and Modeling*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Corpochivor, C. A. R. de C., & UPTC, U. P. y T. de C. (2014). *Plan de manejo ambiental de acuíferos municipios de Boyacá, Jenesano, Nuevo Colón, Turmequé y Ventaquemada, fase I diagnóstico*.

Ecuación de continuidad. (s/f). Recuperado el 15 de abril de 2021, de <https://www.youphysics.education/es/ecuacion-de-continuidad/>

Emergencia en San Andrés por tormentas e inundaciones - Otras Ciudades - Colombia - ELTIEMPO.COM. (s/f). Recuperado el 11 de abril de 2021, de <https://www.eltiempo.com/colombia/otras->

ciudades/emergencia-en-san-andres-por-tormentas-e-inundaciones-107998

Fernandez-Escalante, E., San Sebastian Sauto, J., Villanueva Lago, M., & Calero Gil, R. (2018). La recarga gestionada de los acuíferos como una técnica polivalente y efectiva de adaptación al cambio climático. *Conama 2018*, (January 2019), 0–27.

Fernández Escalante, E., Navarro Benegas, R., Guerrero Salazar, P., & Rojas Vega, C. (2019). *Managed Aquifer Recharge: Local solutions to the global water crisis* (E. Fernández Escalante, Ed.). Madrid España.

Ferreira Da Silva, J. F., Naim, H., Cunha, M. de C., & T., R. L. (2001). *Optimal Management in Saltwater-Intruded Coastal Aquifers*. 13.

Ghielmi, G., Mondaca, G., & Luján, M. (2008). *Diagnóstico sobre el nivel de contaminación de acuíferos en el distrito 9 del municipio de Cercado en la ciudad de Cochabamba y propuesta para su protección y control*. 4, 51–86.

Gibson, M. T., Campana, M. E., & Nazy, D. (2018). Estimating Aquifer Storage and Recovery (ASR) Regional and local suitability: A case study in Washington State, USA. *Hydrology*, 5(1), 19. <https://doi.org/10.3390/hydrology5010007>

González Pérez, D. F., & Medina Sandoval, D. (2017). *Visor Geográfico web del sistema acuífero de Tunja*.

Guerrero Jiménez, T. (2019). Crisis del agua, turismo y variabilidad climática en la isla de San Andrés. *Turismo y Sociedad*, 26, 127–154. <https://doi.org/10.18601/01207555.n26.06>

Haie, N., Engineering, C., li, P., Ist, M., & Pais, R. (2007). Optimal Management of Groundwater Withdrawals in Coastal Aquifers. *System*, 1–8.

Hamdan, S. (2012). *Artificial Recharge of Groundwater with Stormwater as a New Water Resource - Case*

Study of the Gaza Strip , Palestine. 186.

Hernández-Espriú, A., Arango-Galván, C., Reyes-Pimentel, A., Martínez-Santos, P., Pita de la Paz, C., Macías-Medrano, S., ... Breña-Naranjo, J. A. (2017). *Water Supply Source Evaluation in Unmanaged Aquifer Recharge Zones : The Mezquital Valley*. 1–25. <https://doi.org/10.3390/w9010004>

Huízar Álvarez, R., Carrillo Rivera, J. J., & Juárez, F. (2016). Fluoruro en el agua subterránea: niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*, 2016(90), 40–58. <https://doi.org/10.14350/rig.47374>

IDEAM. (2018). Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA 2018. *Cartilla ENA 2018*, 56.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-210 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Enfoque Nacional - DEpartamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. En *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático* (Primera ed). Bogota D.C., Colombia.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, Ruíz Murcia, F., ... Rodríguez Salgado, M. (2015). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100*.

Ingeoexpert, Guimerá, J., & Vilanova, E. (2021). *Flujo de agua en medios porosos*. Recuperado de <https://ingeoexpert.com/articulo/flujo-agua-medios-porosos/>

Inmet, S. y C. S. A. C., Bobadilla Diaz, P., Romero Neira, F., & Ministerio de Vivienda, C. y S. (2016). *Sistematización de la IV Conferencia Latinoamericana de Saneamiento*. 96. Lima, Perú.

Intergovernmental Panel on Climate Change, I. (2017). *AR6 Scoping Meeting Addis Ababa*. 2(May), 45.

Intergovernmental Panel on Climate Change, I. (2021a). *2021 Technical report*.

Intergovernmental Panel on Climate Change, I. (2021b). *Assessment Report 6 Climate Change 2021: The*

Physical Science Basis. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Javadi, Akbar; Hussain, Mohammed S.; Sherif, M. M. (2015). Optimal control of seawater intrusion in coastal aquifers. *ORE Open Research Exeter*.

Karimov, A., Smakhtin, V., Gracheva, I., & Miryusupov, F. (2014). *Managed Aquifer Recharge: Potential Component of Water Management in the Syrdarya River Basin*. (March 2015), 15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001046](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001046)

Kovacs, K. F., Mancini, M., & West, G. (2015). Landscape irrigation management for maintaining an aquifer and economic returns. *Journal of Environmental Management*, 160, 271–282. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.06.028>

Liu, X., Ren, Z., Ngo, H. H., He, X., Desmond, P., & Ding, A. (2021). Membrane technology for rainwater treatment and reuse: A mini review. *Water Cycle*, 2, 51–63. <https://doi.org/10.1016/J.WATCYC.2021.08.001>

López Cualla, R. A. (2003). *Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados* (Segunda Ed; Escuela Colombiana de Ingeniería, Ed.). Bogota D.C., Colombia.

Maldonado, J. M. (2009). Ciudades y contaminación ambiental. *Revista de Ingeniería ISSN:*, 66–71.

Manjarres F, G. (1965). *Datos Hidrogeologicos sobre algunos sectores del departamento de Boyacá*. Bogota D.C., Colombia.

Marín Ramírez, R., & Gutiérrez Palacio, G. N. (2018). *El agua en la ciudad y los asentamientos humanos* (Marín Ramí). Bogota D.C., Colombia.

Mas-Pla, J., Menció, A., & Folch, A. (2013). Analyzing Groundwater Resources Availability using Multivariate Analysis in the Selva Basin (NE Spain). *Procedia Earth and Planetary Science*, 7, 582–

585. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2013.03.111>

Minambiente, M. de A. y D. S., & Coralina, C. para el D. S. del A. de S. A. P. y S. C. (2013). Proyecto piloto de recarga artificial de los acuíferos de San Andrés, como una medida de adaptación al cambio climático que beneficie a la comunidad étnica raizal de la reserva de la biosfera Seaflower. En *Area*.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, M. (2010). *Política Nacional Recurso Hídrico*.

Ministerio de Salud. (2018). *Unidad Temática N°3: Vigilancia Y Control De La Calidad Del Agua*.

Recuperado de <http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/4516.pdf>

Miraflores Boyacá. (s/f). Recuperado el 11 de abril de 2021, de <https://lengupaturistico.blogspot.com/2018/10/miraflores-boyaca.html>

Monroy Vargas, E. R., González Galvis, J. P., & Peñaranda Vélez, V. M. (2010). *Introducción a la Formulación de Planes de Manejo y Protección de Acuíferos* (1a ed.; Universidad Santo, Ed.). Tunja- Colombia.

Occidente, U. T. A. de, Tunja, M. de, & Boyacá, G. de. (2015). *Acueducto Regional de Occidente*. 103.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura, U. (2009). *Estudios de caso Cambio climático y Patrimonio Mundial*.

Organización Mundial de la Salud, O. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano.

Organización Mundial de la Salud, 4, 608. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Peralta, A., & López, E. (2012). Los Acuíferos de nuestro país: un tesoro para las generaciones venideras.

*Ciencia y Tecnología*2, 73–82. Recuperado de http://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2013/12/12CyT_06losacuiferos.pdf

Pérez Campomanes, G. (2016). *Manual De Obras Hidraulicas*.

Potter, M. C., Wiggert, D. C., Ramadan, B., Shih, T. I.-P., Romo Muñoz, J. H., & León Cárdenas, J. (2015). *Mecánica de fluidos*.

Prestaciones de PTC Mathcad | Mathcad. (s/f). Recuperado el 13 de abril de 2021, de <https://www.mathcad.com/es/capabilities>

Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas [WWAP]. (2016). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo. En *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2016: Agua y Empleo*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>

Proyecciones de población. (s/f). Recuperado el 12 de septiembre de 2021, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

Qureshi, A.S., Ahmed, Z.U., Krupnik, T. J. (2015). Groundwater management in Bangladesh: An analysis of problems and opportunities. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.13140/2.1.2381.9040>

Ramirez Martinez, L., & Vargas Mora, T. (2018). *Evaluación De La Vulnerabilidad a La Contaminación Por Cuña Marina En Los Acuíferos De La Isla De San Andrés (Colombia) Bajo Escenarios De Cambio Climático*. 123. Recuperado de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13992/1/VargasMoraTatianaAndrea2018.pdf>

Reyes Hernandez, A. M., & Castillo Forero, M. Á. (2017). ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE FUENTES ALTERNAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL

- ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRES, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA. *Occupational Medicine*, 53(4), 130.
- Robert G, M. de C., Varady, S. B., Megdal, K. I., Conti, J. V. D. G., Merla, A., Nijsten, G., & Scheibler, F. (2017). *Freshwater Governance for the 21st Century*. 6, 205–227. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43350-9>
- Sáenz Galvis Kristy Dayana, C. C. C. A. (2014). *Evaluación de la recarga de acuíferos en la cuenca del río Chicamocha* (pp. 43–47). pp. 43–47.
- Sahuquillo, A. (2009). La importancia de las aguas subterráneas. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103, 97–114.
- San Andrés controla su población - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com. (s/f). Recuperado el 6 de abril de 2021, de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-601819>
- Sultana, S., Ahmed, K. M., & Mia, M. B. (2010). Prospects of Artificial Recharge for Augmentation of the Upper Dupi Tila Aquifer in Dhaka City , Bangladesh. *Alternative Recharge Systems Prospects*, (June 2016).
- UN-Habitat, U. N. H. S. P. (2016). *Urbanization and development: emerging futures*.
- UNESCO. (2015a). *Aguas subterráneas y cambio climático. Pequeños estados insulares en desarrollo (PEID)*. 16.
- UNESCO. (2015b). Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015 Agua para un Mundo Sostenible. *Wwdr*, 12.
- Van der Gun, J. (2012). *Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges*.

<https://doi.org/978-92-3-001049-2>

Vaqharfard, H., & Dashtpajardi, M. M. (2014). Delineation of Groundwater Recharge Sites Using GIS Case Study : Sefied dasht. *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(5), 1316–1324. Recuperado de https://pdfs.semanticscholar.org/1581/0e8332cd2d8d1e7c685091e77eb33bb4bc72.pdf?_ga=2.111128133.1928902958.1579591155-712525998.1577015844

Vargas-Cuervo, G. (2004). Geología y Aspectos Geográficos de la Isla de San Andrés, Colombia. *Geología Colombiana*, 29(0), 73–89.

Velásquez, C. (2020). The 2016 Water Crisis in San Andres Island: An Opportunity for Change? *Ciencia Política*, 15(29), 73–109. <https://doi.org/10.15446/cp.v15n29.86373>

Velis, M., Conti, K. I., & Biermann, F. (2017). Groundwater and human development: synergies and trade-offs within the context of the sustainable development goals. *Sustainability Science*, 12(6), 1007–1017. <https://doi.org/10.1007/s11625-017-0490-9>

Veolia, A. de T. (2017). *MANUAL DE DISEÑADORES, CONSTRUCTORES Y URBANIZADORES Veolia Aguas de Tunja*. 39.

Vuille, M. (2013). El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes Tropicales. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 21. Recuperado de http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5826/SR2012_VUILLE_FINAL_ESP.pdf?sequence=1

Yapa, K. A. S., & Berkeley, U. C. (2013). *Prácticas ancestrales de crianza de agua*.

Anexos

Anexo 1. Planos

Anexo 2. Acuífero Sector Tunja 2021- I. Estado Actual

Anexo 3. Acuífero Sector Tunja 2021- II. Únicamente Aportes Externos

Anexo 4. Acuífero Sector Tunja 2021- III. Situación Crítica

Anexo 5. Análisis Acuífero San Andrés- I. Situación Actual

Anexo 6. Análisis Acuífero San Andrés- II. Situación Crítica

Anexo 7. Proyección Sistema Acuífero de Tunja 2040-2100

Anexo 8. Proyección Sistema Acuífero San Andrés 2040-2100