GUÍA CONCEPTUAL PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN COLOMBIA

UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia
Vigilada Mineducación

2022

GUÍA CONCEPTUAL PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN COLOMBIA

UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia
Vigilada Mineducación

ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

Elaborado por:

Ing. Weimar Leonardo Arévalo Sastoque
Ing. Andrea Caicedo Gaviria

Docente:

Msc. LILIANA MARCELA ROJAS TRONCOSO

JURADO REVISOR No. 1
Msc. Nathaly Guiza Villa

JURADO REVISOR No. 2
Msc. Nathalia Kateryne Tinjacá Jiménez

Diseño y Diagramación
Ing. Weimar Leonardo Arévalo Sastoque
Ing. Andrea Caicedo Gaviria

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS
BOGOTÁ D.C
2022

CONTENIDO

1. USO DEL RECURSO 17
1.1. DETERMINAR EL USO DEL RECURSO 17
1.2. IDENTIFICAR LA NORMATIVA VIGENTE EN COLOMBIA 18
1.3. IDENTIFICAR LA ENTIDAD AMBIENTAL COMPETENTE 22
1.4. SOLICITUD DE PERMISO 26
1.4.1. PERMISO DE EXPLORACIÓN 26
1.4.2. PERMISO DE EXPLOTACIÓN 27
1.4.3. CONCESIÓN 28
2. MODELO GEOLOGICO Y GEOFISICO 30
2.1. EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN GEOLÓGICA 30
2.2. FUENTES DE INFORMACIÓN 31
2.2.1. MAPA GEOLÓGICO DE COLOMBIA 32
2.3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA 37
2.3.1. CLASIFICACIÓN DE UNIDADES 37
2.3.2. ACUÍFEROS 37
2.3.3. ACUITARDOS 41
2.3.4. ACUICLUDOS 41
2.3.5. ACUIFUGO 42
2.3.6. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN COLOMBIA 44
2.4. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA 63
2.4.1. ESTUDIO GEOLÉCTRICO 63
2.4.2. RESISTIVIDAD 64
2.4.3 RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS Y ZONAS SATURADAS 65
2.4.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES 66
2.4.5 TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS 70
3. MODELO HIDROLÓGICO 73
3.1. INVENTARIO DE PUNTOS HIDROGEOLÓGICOS 73
3.1.1. NIVELES PIEZOMÉTRICOS 75
3.1.2. USOS 75
3.1.3. CALIDAD 78
3.1.4. TIPO DE CAPTACIÓN 78
3.2. ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES Y RECARGA 83
3.2.1. PRECIPITACIÓN 83
3.2.2. TIPOS DE FLUJO 85
3.2.3. CÁLCULO DE LA RECARGA 91
3.2.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN 95

4. MODELO HIDRÁULICO 100
4.1. LÍNEAS DE FLUJO Y SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES 101
4.1.1. LÍNEAS DE FLUJO 101
4.1.2. REDES DE FLUJO 103
4.2. CAUDAL DEMANDADO 104
4.2.1. DOTACIÓN NETA 104
4.2.2. DOTACIÓN BRUTA 104
4.2.3. CAUDALES DE DISEÑO 105
4.3. TIPO DE CAPTACIÓN 108
4.3.1. NACEDERO (MANANTIAL) 110
4.3.2. ALJIBES (POZOS EXCAVADOS) 111
4.3.3. POZOS BARRENADOS O TALADRADOS 113
4.3.4. POZOS HINCADOS 113
4.3.5. POZOS PERFORADOS 114
4.4. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA 117
4.4.1. BALDEO 117
4.4.2. MOLINOS DE VIENTO 118
4.4.3. BOMBAS MANUALES 122
4.4.4. BOMBAS DE SUPERFICIE 125
4.4.5. BOMBAS SUMERGIBLES 128
4.4.6. BOMBAS SOLARES 131
4.5. CONSTRUCCIÓN DE UN POZO 132
4.5.1. ALJIBE 132
4.5.2. CONSTRUCCIÓN DE POZO CON MÁQUINA 135
4.6. REJILLA PARA POZO PROFUNDO 137
4.7. PROPIEDADES HIDRÁULICAS 138
4.7.1. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD 138
4.7.2. PRUEBAS DE BOMBEO 141
4.7.3. ENSAYOS RÁPIDOS 142
4.8. CAPACIDAD ESPECÍFICA 147
4.8.1. SOBREEXPLOTACIÓN 147
5. CALIDAD DE AGUA 149
5.1. PARÁMETROS FÍSICO, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS A TENER EN CUENTA EN EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA 149
5.2. FUENTES DE CONTAMINACIÓN 151
5.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA 152
5.3.1. DIAGRAMA DE PIPER 153
6. MODELO HIDROGEOLÓGICO 155

6.1. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 155
6.2. MODELO NUMÉRICO.....157
6.2.1. METODOLOGÍA DRASTIC.....160

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Etapas que definen las disposiciones reglamentarias de la explotación de agua subterránea en Colombia....17
Ilustración 2. Localización de las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia....25
Ilustración 3. Etapas que definen la exploración de agua subterránea....30
Ilustración 4. Mapa Geológico de Colombia....32
Ilustración 5. Paso 1 para la obtención de planchas geológicas del SGC....33
Ilustración 6. Paso 2 para la obtención de planchas geológicas del SGC....33
Ilustración 7. Paso 3 para la obtención de planchas geológicas del SGC....34
Ilustración 8. Paso 4 para la obtención de planchas geológicas del SGC....35
Ilustración 9. Paso 1 para la descarga de mapas del IGAC....35
Ilustración 10. Paso 2 para la descarga de mapas del IGAC....36
Ilustración 11. Paso 3 para la descarga de mapas del IGAC....36
Ilustración 12. Descarga de fotografías aéreas del Banco Nacional de Imágenes 37
Ilustración 13. Acuíferos Semiconfinados....39
Ilustración 14. Acuífero poroso....39
Ilustración 15. Acuífero Fisurado....40
Ilustración 16. Acuífero Kárstico....41
Ilustración 18. Provincias Hidrogeológicas Costeras e Insulares (PC)....45
Ilustración 19. Provincias hidrogeológicas pericratónicas (PP)....45
Ilustración 20. Provincias hidrogeológicas montanas e intramontanas (PM)....46
Ilustración 21. Provincias hidrogeológicas de Colombia....47
Ilustración 22. Resistividad de las rocas....65
Ilustración 23. Esquema del terrometro....66
Ilustración 24. Terrometro....67
Ilustración 25. Arreglo Wenner....67
Ilustración 26. Arreglo Schlumberger....68
Ilustración 27. Ubicación de electrodos en las tomografías....70
Ilustración 28. Perfil generado luego de una tomografía....71
Ilustración 29. Etapas que definen el modelo hidrológico....73

llustración 30. Pozo Profundo 79
Ilustración 31. Aljibe 79
Ilustración 32. Nacedero 80
Ilustración 33. Piezómetro 81
Ilustración 34. Mapa de Inventario Consolidado de Puntos de Agua Subterránea 82
Ilustración 35. Mapa de Precipitación Media Total Anual Promedio Multianual 1981-2010 84
Ilustración 36. Mapa Piezométrico 85
Ilustración 37. Flujo paralelo a las Capas 87
Ilustración 38. Flujo Perpendicular a las Capas 87
Ilustración 39. Sistemas de Flujo Subterráneo 89
Ilustración 40. Diferentes Sistemas de Flujo de Agua Subterráneas a Escala Dentro de una Cuenca. 90
Ilustración 41. Condiciones a cumplir en un sistema de flujo de aguas subterráneas 90
Ilustración 42 Ejemplo de Evapotranspiración anual. 96
Ilustración 43. Etapas que definen el modelo hidráulico 100
Ilustración 44. El agua Subterránea no siempre circula de los puntos más altos hacia los más bajos 101
Ilustración 45. Línea de Flujo ABC 102
Ilustración 46. Superficies Equipotenciales 102
Ilustración 47. Superficie Equipotenciales Bajo Una Ladera y el Correspondiente Perfil don Red de Flujo 103
Ilustración 48. Condiciones para el trazado de una red de flujo 103
Ilustración 49. Algunas normales generales para la localización de los pozos. ... 109
Ilustración 50. Clasificación de pozos de agua subterránea según su construcción 109
Ilustración 51. Tipos de Pozos según su Construcción 110
Ilustración 52. Manantial el Sereno 110
Ilustración 53. Aljibe 111
Ilustración 54. Pozo Excavado con Camisa de Concreto 112
Ilustración 55. Metodologías de extracción en aljibes 112
Ilustración 56. Metodologías de extracción en pozos barrenados 113

Ilustración 57. Pozo Hincado 114
Ilustración 58. Pozo Perforado 115
Ilustración 59. Clasificación de acuerdo al tipo de captación 116
Ilustración 60. Clasificación de los métodos de extracción de agua subterránea 117
Ilustración 61. Extracción de agua por Baldeo 118
Ilustración 62. Sistemas de Extracción en los Molinos 119
Ilustración 63. Molino de Viento de Extracción de Agua Ramell 120
Ilustración 64. Molino de viento de extracción de agua palas 121
Ilustración 65. Mecanismos de Bombeo a) Arrastre, b) Pistón, c) Diafragma, d) Cavidad Progresiva 123
Ilustración 66. Tipos de Bombas Manuales 124
Ilustración 67. Bomba Centrifuga 126
Ilustración 68. Bomba Axial 127
Ilustración 69. Bomba de Flujo Mixto 127
Ilustración 70. Impulsión de agua en bomba sumergible 128
Ilustración 71. Bomba Sumergible 129
Ilustración 72. Bomba sumergible en Pozo 130
Ilustración 73. Extracción de agua subterránea con bomba sumergible 130
Ilustración 74. Bomba Solar 131
Ilustración 75. Bomba Solar en Pozo 132
Ilustración 76. Excavación de Aljibe 132
Ilustración 77. Construcción de Aljibe, Etapa de Mampostería 133
Ilustración 78. Construcción de Aljibe, Etapa de Concreto 133
Ilustración 79. Bomba de Superficie en Pozo 134
Ilustración 80. Materiales y herramientas más frecuentes en la construcción de un aljibe 134
Ilustración 81. Sistema de Perforación de Pozos 135
Ilustración 82. Materiales para la construcción de un pozo 136
Ilustración 83. Rejilla Para Pozo Profundo 137
Ilustración 84. Clasificación de la longitud de rejillas para pozos profundos 137
Ilustración 85. Prueba de Bombeo 142
Ilustración 86. Ensayo Lugeon 143

Ilustración 87. Pasos a seguir para realizar el ensayo de Lefranc 144
Ilustración 88. Ensayo Lefranc a Carga Constante 145
Ilustración 89. Ensayo Lefranc a Carga Variable. 145
Ilustración 90. Etapas de la evaluación de la calidad del agua. 149
Ilustración 91. Representación del diagrama de Piper 153
Ilustración 94. Modelo hidrogeológico conceptual del Valle de Aburrá 156
Ilustración 95. Modelo numérico 159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad ambiental 18
Tabla 2. Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia 23
Tabla 3. Clasificación hidrológica 42
Tabla 4 Valores de porosidades intergranulares para algunas rocas 42
Tabla 5. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Sinú-San Jacinto 48
Tabla 6. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Valle Bajo del Magdalena 49
Tabla 7. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Guajira 50
Tabla 8. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Cesar-Ranchería 51
Tabla 9. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Urabá 52
Tabla 10. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Choco 53
Tabla 11. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Tumaco 54
Tabla 12. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia San Andrés 54
Tabla 13. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Caguán-Putumayo 55
Tabla 14. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Vaupés-Amazonas 56
Tabla 15. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Llanos orientales 57
Tabla 16. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Valle Medio del Magdalena 58
Tabla 17. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Valle Alto del Magdalena 59
Tabla 18. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Cauca-Patía 60
Tabla 19. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Cordillera oriental 61
Tabla 20. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Catatumbo 62

Tabla 21. Información requerida arreglo Wenner.....69
Tabla 22. Información requerida arreglo Schlumberger.....69
Tabla 23. Distribución del uso de aguas subterráneas por provincia hidrogeológica. 76
Tabla 24. Componentes del coeficiente de infiltración.....93
Tabla 25. Componentes del coeficiente de infiltración.....93
Tabla 26. Punto de marchitez y capacidad de campo. 95
Tabla 27. Profundidad de raíces.....95
Tabla 28. Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida 105
Tabla 29. Caudales de Diseño.....105
Tabla 30. Rangos de Trabajo y Rendimiento de Bombas Manuales 125
Tabla 31. Clasificación de unidades hidrogeológicas según su conductividad hidráulica 139
Tabla 32 Clasificación de terrenos por la Permeabilidad. 139
Tabla 33 Clasificación de unidades hidrogeológicas según coeficiente de almacenamiento.....140
Tabla 34. Calificación de la magnitud de la transmisividad.....141
Tabla 35. Parámetros sugeridos para monitoreo de la calidad de agua.....150
Tabla 36. Valores admisibles de agua potable 150
Tabla 37. Fuentes más comunes de contaminación de las aguas subterráneas.152
Tabla 38 Ejemplos de Software y códigos para modelación hidrogeológica 158

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Velocidad de Flujo, Ley de Darcy.....88
Ecuación 2. Velocidad de Flujo con Delta h, Ley de Darcy.....88
Ecuación 3. Caudal, Ley de Darcy.....89
Ecuación 4. Retención superficial.....92
Ecuación 5. 92
Ecuación 6. Coeficiente de infiltración. 93
Ecuación 7. Infiltración.....93
Ecuación 8. Precipitación.....94

Ecuación 9. Escorrentía.....94
Ecuación 10. Evapotranspiración.....95
Ecuación 11. Evapotranspiración potencial 96
Ecuación 12. Porcentaje por volumen 97
Ecuación 13. Coeficiente de humedad 97
Ecuación 14. Coeficiente de humedad a final de mes 97
Ecuación 15. Coeficiente de humedad a final del mes, después de ocurrida la evapotranspiración.....97
Ecuación 16. Evapotranspiración potencial real 97
Ecuación 17. Dotación Bruta 105
Ecuación 18. Caudal Medio Diario.....107
Ecuación 19. Caudal Máximo Diario 107
Ecuación 20. Caudal Máximo Horario.....107
Ecuación 21. Cálculo de Longitud Mínima de Rejilla Para Pozo Profundo 138
Ecuación 22. Coeficiente de Almacenamiento.....139
Ecuación 23. Transmisividad 141
Ecuación 24. Transmisividad en función del espesor saturado h 141

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que cuenta con abundancia en recursos hídricos, encontrando fuentes superficiales y subterránea que se han utilizado a lo largo de los años para el abastecimiento de la población; sin embargo, el crecimiento de las regiones, tanto en ciudades capitales como municipios, el aumento de la industria y en general un aumento significativo de la demanda del agua, ha generado que sean necesarios elementos que gestionen el recurso, normativas que regulen su uso, guías que estandaricen un buen manejo y programas que promocionen conciencia a cerca del cuidado del recurso, todo esto, con el fin de mitigar y evitar problemáticas de abastecimiento y contaminación.

Si se tienen en cuenta algunos datos, de acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en 2017 el 60% del agua procedente de las llaves de hogares colombianos no está en condiciones óptimas de potabilización. Sumado a lo anterior, si se evalúa el avance de cobertura de los sistemas de acueducto a nivel nacional, de acuerdo con datos del MADS para el año 2015, el 28% de la población que hace parte de las zonas rurales del país enfrentan una situación crítica por la falta de acueducto, por lo que muchas personas deben acudir a fuentes de abastecimiento sin ningún tipo de calidad en el agua para consumo. El porcentaje anterior corresponde aproximadamente a unos 3.1 millones de colombianos, donde las poblaciones de Pacífico y Atlántico son las que presentan mayor carencia en el servicio.

A nivel nacional las poblaciones que presentan una problemática mayor en cuanto a cobertura, continuidad y calidad son las poblaciones rurales, el número de habitantes de las zonas rurales en Colombia es aproximadamente 11.7 millones, si el 28% no cuenta con servicio de acueducto, y adicionalmente de acuerdo con un informe del Instituto Nacional de Salud (INS) en 2015 en el cual se reveló que solo el 15.1% utilizan agua de buena calidad lo que aproximadamente son 0.9 millones de habitantes deja en evidencia el estado de los sistemas de acueducto en el país, ya que el 43.6% usa agua con bajas propiedades de calidad y el 23.3 % utiliza agua cruda.

De igual manera, es importante resaltar que, sumado a la falta de cobertura y calidad de sistemas de acueductos, no todas las fuentes de agua superficiales o subterráneas que se utilizan para el abastecimiento de agua, se explotan de la mejor manera o cuenta con los permisos por parte de las diferentes corporaciones, lo que genera un daño ambiental; ya que no se evalúa el impacto de la captación ni se lleva un control adecuado de las mismas.

En sincronía con lo anterior y buscando un aporte en la adecuada gestión del recurso hídrico, a continuación, se propone la “Guía conceptual para la extracción de aguas subterráneas en Colombia” la cual corresponde a un documento en donde se presenta de una forma sistemática las generalidades de cómo lograr un adecuado proceso de captación de agua subterránea, enmarcada en aspectos técnicos y de buenas prácticas que ayuden a contextualizar tanto a personas naturales, como jurídicas, instituciones y otros grupos de interés interesados en el aprovechamiento del agua subterránea.

El uso de aguas subterráneas en Colombia es de gran importancia, toda vez que con su aprovechamiento se ha podido brindar cobertura a sectores como el doméstico, agrícola, industrial y pecuario, entre otros, siendo el uso agrícola el que más aprovecha este recurso con un 75%[1], sin embargo, si se lograra potencializar el uso doméstico se podría atender una mayor población del territorio, logrando ofrecer continuidad del servicio y de agua de buena calidad, minimizando la utilización de sistemas de acueductos desde una fuente de agua superficial.

Según el IDEAM, hidrogeológicamente Colombia tiene gran potencial de aguas subterráneas en sus cuencas sedimentarias, que sumado con las condiciones climáticas y sus características topográficas que permiten buenas condiciones para la infiltración hacia los acuíferos, haciendo que este recurso presente buenas condiciones de disponibilidad y de calidad de gua.

Con lo anterior se justifica la necesidad de formular esta guía para la extracción de agua subterránea, que tiene como objetivo fomentar el uso de aguas subterráneas en el país de una manera técnica, que siga los lineamientos de políticas nacionales de gestión del agua y que permita el aprovechamiento de acuíferos en el país.

Esta guía se encuentra dividida en seis capítulos, que se encuentran distribuidos en los elementos que componen un modelo hidrogeológico conceptual, el cual es el principal mecanismo para una correcta caracterización y aprovechamiento de acuíferos, según como lo estima la metodología de Evaluación Regional del Agua del IDEAM.

Esta guía está escrita como un paso a paso, en la cual el usuario interesado en una captación puede conocer y entender cuáles son los procedimientos necesarios para lograr un aprovechamiento de agua subterránea, así mismo, que con este proceso

[1] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, CAPÍTULO 4, OFERTA Y USO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN COLOMBIA, Reservas de agua subterránea en Colombia

se pueda brindar información que permita caracterizar las condiciones hidrogeológicas de un sector y que se genere conciencia de que el procedimiento de abastecimiento de agua subterránea es un procedimiento con bases técnicas que se enmarcan en sistemas de gestión del recurso hídrico.

Teniendo en cuenta que esta guía es un instructivo de conceptualización, esta tiene como limitantes que algunos de los elementos presentados no podrán ser de ejecución directa por el usuario interesado en la captación, dado que requieren de una experticia específica en ese campo, pero sí servirá de guía para llevar un control adecuado del procedimiento general de las captaciones de agua subterránea.

El primer capítulo de esta guía corresponde a la normatividad o uso del recurso, en este se describe paso a paso cuál es la normatividad vigente que rige el agua subterránea, quiénes son las autoridades que regulan el recurso, cuáles son las instituciones que cuentan con la información acerca del agua subterránea y dependiendo del uso final del recurso, quienes son los llamados a solicitar un permiso de concesión.

El segundo capítulo se enmarca en el modelo geológico – geofísico, en este instructivo el usuario podrá entender cuáles son las características requeridas para que una zona tenga potencial de aguas subterráneas, partiendo de información regional de geología para identificar sistemas acuíferos, cómo obtener esta información, cuáles son los conceptos utilizados en la identificación de unidades hidrogeológicas y comprender algunos elementos que permiten profundizar en información técnica para la identificación de acuíferos de los que se quiere obtener una captación, como lo es la prospección geoeléctrica.

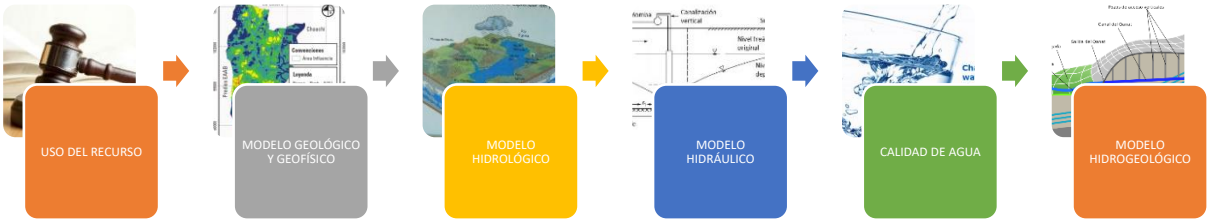
El tercer capítulo de esta guía comprende el procedimiento a seguir para entender un modelo hidrológico, el cual permite establecer la disponibilidad de agua en el sector, partiendo del inventario de puntos hidrogeológicos, así como de la importancia de las condiciones climáticas.

En el cuarto capítulo de esta guía se presenta el modelo hidráulico, en donde se explica como es el movimiento del agua subterránea, cuáles son los tipos de captación existentes y cuál de estos se acopla a la necesidad específica del usuario, así mismo, se expone cómo se obtienen los parámetros hidráulicos de cada captación y para qué sirve cada uno de ellos, teniendo en cuenta que estos ayudan a caracterizar el sistema acuífero.

En el quinto capítulo se presenta los elementos que son necesarios para entender un poco de la calidad del agua o modelo hidroquímico, que permite generar conciencia de por qué una captación debe estar en buenas condiciones, cuáles son las posibles afectaciones del agua subterránea y cuál es la importancia de conocer

las condiciones químicas del recurso hídrico.

Finalmente, en la última sección de esta guía se exponen elementos adicionales y de mayor especificidad que son requeridos para problemas hidrogeológicos puntuales, tales como cómo se compila finalmente un modelo hidrogeológico conceptual, qué es un modelo hidrogeológico numérico, cuáles son algunos problemas específicos que requieren avanzados métodos de investigación, que aunque no son competencia de esta guía para la extracción de agua subterránea, permite a los lectores conocer de manera preliminar otros elementos que componen el análisis de los sistemas acuíferos.



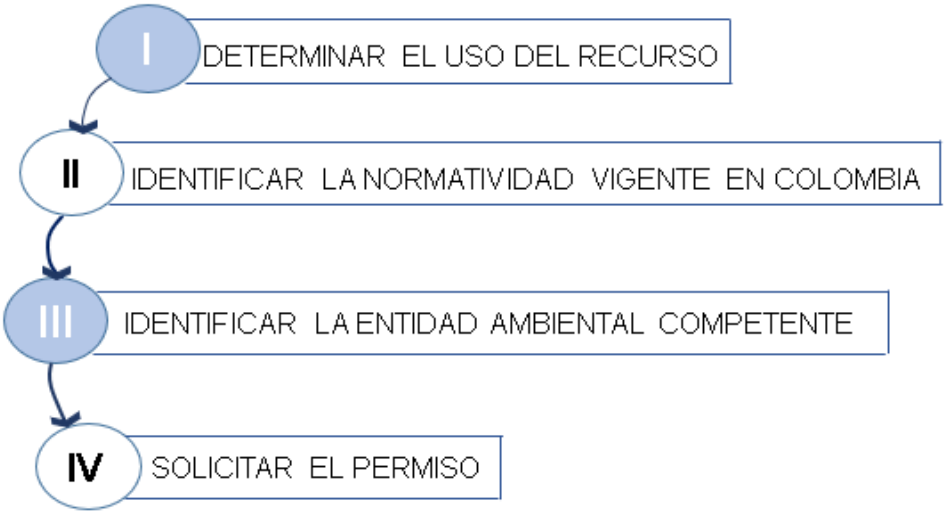
CAPÍTULO 1.

USO DEL RECURSO

1. USO DEL RECURSO

En la búsqueda de agua subterránea es importante definir las disposiciones reglamentarias aplicadas en Colombia para la explotación de este recurso. Esta sección está definida por cuatro etapas que contribuyen al objetivo principal, como se puede apreciar en la Ilustración 1. El primer paso es determinar el uso que se le desea dar al recurso, posteriormente se debe identificar la normativa ambiental vigente en Colombia, en una tercera fase se reconoce la entidad competente para la solicitud de los permisos de exploración y explotación del recurso y finalmente se deben solicitar los permisos necesarios.

Ilustración 1. Etapas que definen las disposiciones reglamentarias de la explotación de agua subterránea en Colombia



Fuente: Elaboración propia

1.1. DETERMINAR EL USO DEL RECURSO

Como primer paso se realiza la evaluación de los usos del suelo, empleando las definiciones establecidas por la Resolución 0330 de 2017, las cuales se relacionan a continuación:

- Uso residencial: Áreas destinadas a vivienda.
- Uso institucional: Áreas destinadas u ocupadas por equipamiento comunal o administrativo en cualquiera de sus actividades.
- Uso industrial: Áreas destinadas a la transformación de bienes y/o servicios.
- Uso recreativo: Áreas dedicadas al aprovechamiento del tiempo libre y al disfrute paisajístico.
- Uso mixto: Áreas destinadas u ocupadas por dos o más actividades

compatibles o complementarias entre sí.

- Uso comercial: Áreas libres o construidas destinadas y ocupadas predominantemente o exclusivamente a la actividad comercial: venta de bienes y/o servicios.
- Uso de preservación ecológica y ambiental: Áreas de interés paisajístico o ambiental, así como las áreas afectadas por proyectos que tiendan a preservar o restaurar los recursos naturales.

1.2. IDENTIFICAR LA NORMATIVA VIGENTE EN COLOMBIA

Posteriormente, se consulta la normatividad vigente en Colombia aplicable al manejo de aguas subterráneas, teniendo en cuenta el Decreto 1076 de 2015 en el Artículo 2.2.3.2.16.13 “Los aprovechamientos de aguas subterráneas, tanto en predios públicos como privados, requieren concesión de la Autoridad Ambiental competente, las personas naturales no están obligadas a solicitar permisos de concesión ante las autoridades ambientales competentes para el aprovechamiento de aguas subterráneas para usos domésticos. Por el contrario, las personas jurídicas si requieren permisos y/o trámites de concesión dependiendo del uso del agua.

La Tabla 1 presenta las reglamentaciones jurídicas aplicables al manejo de aguas subterráneas en Colombia:

Tabla 1. Normatividad ambiental

NORMA	DESCRIPCIÓN
NTC-ISO 5667-11	Guía para el Muestreo de Aguas Subterráneas. Esta norma pretende ser una guía para el diseño de programas y técnicas de muestreo para el manejo de muestras de agua tomadas de aguas subterráneas, para evaluación física, química y microbiológica.
Ley 99 de 1993. Art. 43	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Tasas por Utilización de Aguas. La utilización de aguas por personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, dará lugar al cobro de tasas fijadas por el Gobierno Nacional que se destinarán al pago de los gastos de protección y renovación de los recursos hídricos, para los fines establecidos por el Artículo 159 del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

NORMA	DESCRIPCIÓN
Decreto 155 de 2004.	Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones. Define en lo relativo a las tasas por utilización de aguas superficiales, las cuales incluyen las aguas estuarinas, y las aguas subterráneas, incluyendo dentro de estas los acuíferos litorales. Excluye las aguas marítimas.
Decreto 3100 de 2003	Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Tasa retributiva por la contaminación que se genera, está más orientado a los cuerpos de aguas superficiales. Las corporaciones Autónomas tienen la competencia del recaudo. Los dineros de la tasa retributiva por vertimientos se destinarán exclusivamente a proyectos de inversión de descontaminación hídrica y monitoreo de calidad de agua.
Constitución Política Colombiana. Art. 78-80	Establece el derecho a gozar de un ambiente sano. Garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de dichos fines. Es responsabilidad del Estado planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.
Decreto Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. El ambiente es patrimonio común. El Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social. Así mismo, regula el manejo de los recursos naturales renovables, entre ellos: Las aguas en cualquiera de sus estados; Los recursos biológicos, de las aguas y del suelo y el subsuelo del mar territorial y de la zona económica de dominio continental e insular de la República.
Decreto 1541 de 1978	Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.” Reglamenta las normas relacionadas con el recurso de aguas en todos sus estados, y comprende entre otros los siguientes aspectos: 1) El dominio de las aguas, cauces y riberas, y normas que rigen su aprovechamiento. 2) La ocupación de los cauces y la declaración de reservas de agotamiento. 3) Las restricciones y limitaciones al dominio. 4) Las condiciones para la construcción de obras hidráulicas que garanticen la correcta y eficiente utilización del recurso. 5) La conservación de las aguas y sus cauces. 6) Las cargas pecuniarias en razón del uso del recurso y para asegurar su mantenimiento y conservación, así como el pago de las obras

NORMA	DESCRIPCIÓN
	hidráulicas que se construyan en beneficio de los usuarios. 7) Las sanciones y las causales de caducidad a que haya lugar por la infracción de las normas o por el incumplimiento de los usuarios.
Ley 9 de 1979	Por la cual se dictan medidas sanitarias. Sobre la protección del medio ambiente, establece normas para el control sanitario de los usos del agua, residuos líquidos, residuos sólidos, disposición de excretas, áreas de captación de aguas, de las aguas superficiales, de las aguas subterráneas, de las aguas lluvias, de la conducción, de las estaciones de bombeo, de la potabilización.
Decreto 1594 de 1984	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Derogado por el Art. 79 del Decreto 3930 de 2010, salvo los artículos 20 y 21. Determinan las sustancias que se consideran sustancias de interés sanitario. Entre ellos, mercurio, cromo, cianuro, níquel, plomo, selenio, algunos etanos clorados, diclorobencenos, hidrocarburos aromáticos.
Decreto 1524 de 1995	Por el cual se delegan las funciones presidenciales de señalar políticas generales de administración y control de eficiencia en los servicios públicos domiciliarios, y se dictan otras disposiciones. Los funcionarios que integran la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico, comienzan a ejercer las funciones asignadas a la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico prevista en el artículo 69 de la Ley 142 de 1994.
Ley 373 de 1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Todo plan ambiental, regional y municipal debe incorporar obligatoriamente un programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Las Corporaciones Autónomas Regionales aprobarán dichos planes. Los planes quinquenales deben contemplar: Reducción de pérdidas, Reúso obligatorio del agua, De los medidores de consumo, Consumos básicos y máximos, Incentivos tarifarios, De los estudios hidrogeológicos, Campañas educativas a los usuarios, Protección de zonas de manejo especial y sanciones.
Decreto 901 de 1997	Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se establecen las tarifas de estas. Establece las definiciones, su forma de cálculo, responsables del recaudo y proceso para reclamaciones.

NORMA	DESCRIPCIÓN
Ley 430 de 1998	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones. Regula todo lo relacionado con la prohibición de introducir desechos peligrosos al territorio nacional, en cualquier modalidad según lo establecido en el Convenio de Basilea y sus anexos. Establece los principios que se deben considerar, las responsabilidades de los generadores y receptores de residuos peligrosos.
Ley 599 de 2000	Por la cual se expide el Código Penal. Habla de los delitos y las penas contra los recursos naturales y el medio ambiente, de los delitos contra los recursos naturales, de los daños en los recursos naturales, de la contaminación ambiental.
Decreto 302 de 2000	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, en materia de prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado. Regula lo pertinente a la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado. Obligaciones y deberes de los usuarios, De la conexión, Del régimen de acometidas y medidores, Del mantenimiento de las instalaciones domiciliarias, Causales de suspensión de los servicios, Causales de corte y terminación del contrato.
Decreto 1713 de 2002	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993, en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos". Normas sobre características y calidad del servicio de Aseo, Componentes, modalidades y clases, Almacenamiento y presentación, Recolección, Transporte, Barrido y limpieza de áreas públicas, Estaciones de transferencia, Sistema de aprovechamiento de residuos sólidos, Libertad de competencia y no abuso de posición dominante, De los deberes y derechos de las personas prestadoras del servicio de aseo, Relaciones entre los usuarios y la persona prestadora del servicio, De los derechos y deberes de los usuarios, de las autoridades ambientales en la gestión integral de los residuos sólidos, competencia y procedimientos para control y vigilancia.
Decreto 1729 de 2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones. Definición, delimitación y uso de cuenca. Medidas de protección.

NORMA	DESCRIPCIÓN
Decreto 838 de 2005	Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Localización de áreas para la disposición final de residuos sólidos, Del interés social y de utilidad pública, Procedimiento, criterios, metodología, prohibiciones y restricciones para la localización de áreas para la disposición final de residuos sólidos, consideraciones ambientales y técnicas de planeación, construcción y operación de rellenos sanitarios, Del control y monitoreo. Sistemas regionales de disposición final de residuos sólidos.
Decreto 1076 de 2015	Por el cual se compila el Decreto 1541 de 1978 y reúne las normas del sector del medio ambiente.
Resolución 0330 de 2017	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.

Fuente: Elaboración propia con base en normatividad existente.

1.3. IDENTIFICAR LA ENTIDAD AMBIENTAL COMPETENTE

A continuación, se mencionan las entidades ambientales en Colombia que tienen competencia para otorgar o renovar las concesiones de exploración y explotación de aguas subterráneas.

Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible: Entes corporativos de carácter público dotados de autonomía administrativa y financiera para administrar los recursos naturales y el medio ambiente; a nivel regional son la primera autoridad ambiental. El artículo 31 de la Ley 99 de 1993 dice textualmente: *"Otorgar concesiones, permisos, autorizaciones y licencias ambientales requeridas por la ley para el uso, aprovechamiento o movilización de los recursos naturales renovables o para el desarrollo de actividades que afecten o puedan afectar el medio ambiente. Otorgar permisos y concesiones para aprovechamientos forestales, concesiones para el uso de aguas superficiales y subterráneas y establecer vedas para la caza y pesca deportiva"*[2]. De igual manera, las corporaciones autónomas regionales deben garantizar el seguimiento y control.

La Tabla 2 consolida las Corporaciones Autónomas Regionales – CAR en Colombia y las ciudades donde se encuentra ubicada la sede principal.

[2] Ley 99 de 1993. Artículo 31.

Tabla 2. Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia

CAR	
NOMBRE	**SEDE**
Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM	Neiva, Huila
Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR	Bogotá D.C.
Corporación Autónoma Regional de Risaralda – CARDER	Pereira, Risaralda
Corporación Autónoma Regional del Dique – CARDIQUE	Cartagena, Bolívar
Corporación Autónoma Regional de Santander – CAS	San Gil, Santander
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico – CDA	Puerto Inírida, Guainía
Corporación Autónoma Regional de Defensa de la meseta de Bucaramanga – CBMB	Bucaramanga, Santander
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Chocó – CODECHOCÓ	Quibdó, Chocó

CAR	
NOMBRE	**SEDE**
Corporación Autónoma Regional de La Guajira - CORPOGUAJIRA	Riohacha, La Guajira
Corporación Autónoma Regional del Guavio - CORPOGUAVIO	Gachalá, Cundinamarca
Corporación Autónoma Regional del Magdalena - CORPAMAG	Santa Marta, Ciénaga, Pivijay, Plato y Santa Ana
Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Mojana y el San Jorge - CORPOMOJANA	San Marcos, Sucre
Corporación Autónoma Regional de Nariño - CORPONARIÑO	Pasto, Nariño
Corporación Autónoma Regional de Norte de Santander - CORPONOR	Cúcuta, Norte de Santander
Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía - CORPORINOQUIA	Yopal, Casanare
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá - CORPOURABÁ	Apartadó, Antioquia

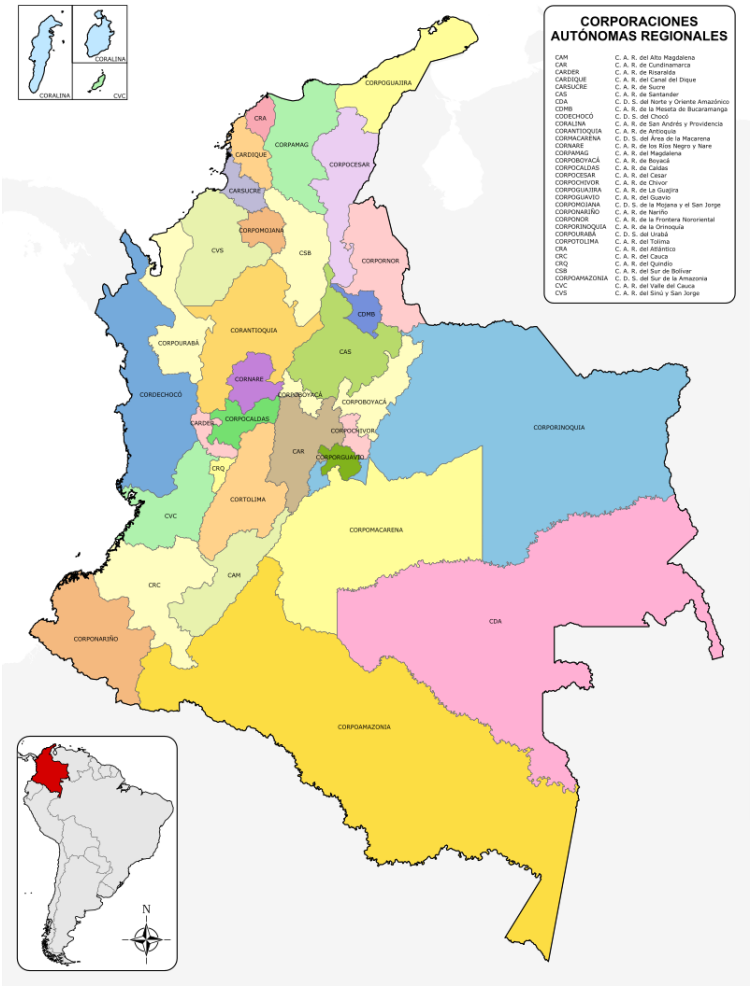
CAR	
Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia – CORANTIOQUIA	Medellín, Antioquia
Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Macarena – CORMACARENA	Villavicencio, Meta
Corporación Autónoma Regional del Río grande de la Magdalena – CORMAGDALENA	Río Magdalena
Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare – CORNARE	El Santuario, Antioquia
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonía – CORPOAMAZONÍA	Mocoa, Putumayo
Corporación Autónoma Regional de Boyacá – CORPOBOYACA	Tunja, Boyacá
Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS	Manizales, Caldas
Corporación Autónoma Regional del Cesar – CORPOCESAR	Valledupar, Cesar
Corporación Autónoma Regional de Chivor – CORPOCHIVOR	Garagoa, Boyacá

CAR	
Corporación Autónoma Regional del Tolima, CORTOLIMA	Ibagué, Lérida, Chaparral, Melgar, Purificación
Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA	Barranquilla, Atlántico
Corporación Autónoma Regional del Cauca - CRC	Popayán, Cauca
Corporación Autónoma Regional del Quindío - CRQ	Armenia, Quindío
Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar - CSB	Magangué, Bolívar
Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC	Santiago de Cali, Valle del Cauca
Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge - CVS	Montería, Córdoba
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina – CORALINA	San Andrés Isla

Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 2, se puede apreciar la distribución geográfica de las Corporaciones Autónomas Regionales que rigen en cada departamento de Colombia.

Ilustración 2. Localización de las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia



Fuente: Imagen consultada de Wikipedia Commons, mayo 2022

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC: Entidad encargada de elaborar el mapa oficial y cartografía de Colombia, catastro nacional de la propiedad inmueble, elaborar inventario de las características de los suelos y adelantar investigaciones geográficas.

Servicio Geológico Colombiano – SGC: Se encarga de realizar el estudio de los recursos naturales y los peligros que estos amenazan, el objetivo del Sistema Geológico Colombiano es realizar investigación científica básica y aplicada del potencial de recursos del subsuelo.

Instituto Colombiano de Desarrollo Rural – INCODER: Entidad encargada de ejecutar y coordinar las políticas de desarrollo rural integral con el fin de permitir el acceso de las comunidades rurales a factores productivos y bienes públicos y contribuir a mejorar la calidad de vida.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM: El IDEAM es una institución pública de apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, que genera conocimiento, produce información confiable, consistente y oportuna, sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio ambiente.[3]

El artículo 17 de la Ley 99 de 1993 dice textualmente: *"El IDEAM deberá obtener, analizar, estudiar, procesar y divulgar la información básica sobre hidrología, hidrogeología".*[4]

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE: Entidad pública encargada de definir la política nacional ambiental y fomentar la conservación, protección, recuperación, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, con el fin de contribuir al desarrollo económico y social del país.[5]

AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES – ANLA: Autoridad encargada de que los proyectos, obras o actividades sujetas de licenciamiento, permiso o trámite ambiental cumplan con la normativa ambiental, de tal manera que contribuyan al desarrollo sostenible ambiental del país.[6]

1.4. SOLICITUD DE PERMISO

Finalmente, se tramitan los permisos de exploración y explotación cuyos requerimientos se describen a continuación.

1.4.1. PERMISO DE EXPLORACIÓN

El Decreto 1541 de 1978, en el Título VII, Régimen de Ciertas Categorías Especiales de Aguas, Capítulo II Aguas subterráneas, Sección 1, artículos 146 a 154, establece que, la prospección y exploración que incluye perforaciones de prueba en busca de aguas subterráneas con miras a su posterior aprovechamiento, tanto en terrenos de propiedad privada como los baldíos, requiere permiso del Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente;

[3] Definición tomada de la página web del IDEAM.

[4] Ley 99 de 1993. Título V. Artículo 17.

[5] Definición tomada de la página web del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

[6] Decreto 3573 de 2011. Por el cual se crea la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA y se dictan otras disposiciones

igualmente determina qué información y documentos se deben adjuntar para la obtención de dicho permiso. Así mismo precisa los aspectos y plazo de entrega del informe en los cuales se debe contemplar lo siguiente: 1. Cartografía geológica superficial; 2. Hidrología superficial; 3. Prospección geofísica; 4. Perforación de pozos exploratorios; 5. Ensayo de bombeo; 6. Análisis físico-químico de las aguas, y 7. Compilación de datos sobre necesidad de agua existente y requerida. El informe debe abordar también los siguientes puntos: a. Ubicación del pozo perforado y de otros que existan dentro del área de exploración o próximos a esta. b. Descripción de la perforación y copias de los estudios geofísicos, si se hubieren hecho; c. Profundidad y método de perforación; d. Perfil estratigráfico de todos los pozos perforados, tengan o no agua; descripción y análisis de las formaciones geológicas, espesor, composición, permeabilidad, almacenaje y rendimiento real del pozo si fuere productivo, y técnicas empleadas en las distintas fases. e. Nivelación de cota del pozo con relación a las bases altimétricas establecidas por el Instituto Geográfico "Agustín Codazzi"; f. Calidad de las aguas; análisis físico-químico y bacteriológico, y g. Otros datos que el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, considere convenientes. Finalmente, determina que los permisos de exploración de aguas subterráneas no confieren concesión para el aprovechamiento de las aguas, pero darán prioridad al titular del permiso de exploración para el otorgamiento de la concesión.

1.4.2. PERMISO DE EXPLOTACIÓN

El Decreto Ley 2811 de 1974, artículo 83, determina que los estratos o depósitos de las aguas subterráneas son de dominio público, inalienables e imprescriptibles; así mismo en el Título II De la explotación y ocupación de cauces, playas, y lechos, Capítulo I Explotación, artículos 99 a 101, establece que se requiere permiso previo para la explotación de cauces, lechos o depósitos de agua, sin perjuicio de la suspensión provisional o definitiva de las explotaciones de que se derive peligro grave o perjuicio para las poblaciones y las obras o servicios públicos.

Si bien, la utilización del agua subterránea data de siglos atrás, es en el último medio siglo, como consecuencia de los avances tecnológicos, que se ha acelerado el uso de esta fuente de abastecimiento, especialmente en países áridos. El ejemplo más representativo es la India, quien bajo la utilización de esta técnica de explotación y abastecimiento, pasó a ser uno de los exportadores de arroz del mundo, no obstante, de las condiciones de aridez de su tierra.

Es hasta el año 2010, que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) expide la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. En el año 2012, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), junto con IDEAM, formularon el Programa Nacional de Aguas Subterráneas, con el fin de diseñar y promover planes para la gestión y aprovechamiento sostenible del agua subterránea, a través del establecimiento de estrategias que garanticen una evaluación y gestión apropiada del uso del agua subterránea.

1.4.3. CONCESIÓN

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, define la concesión como el permiso que otorga la Autoridad Ambiental para obtener el derecho al aprovechamiento de las aguas subterráneas.

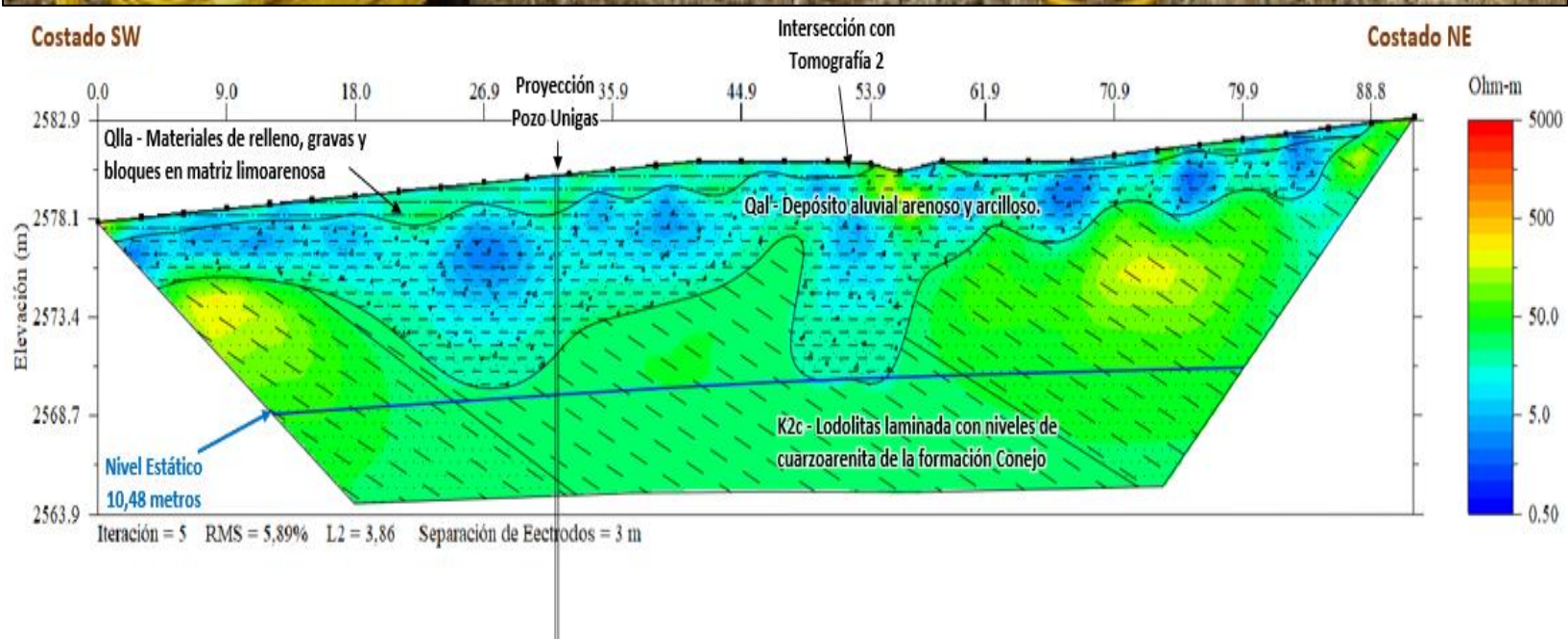
El Decreto Ley 2811 de 1974, en su artículo 51, establece: *"El derecho a usar los recursos naturales renovables puede ser adquirido por ministerio de la ley, permiso, concesión y asociación"*; así mismo en sus artículos 151 a 154, regula sobre las condiciones para el otorgamiento, sobre el derecho preferencial del aprovechamiento de aguas subterráneas que tiene el dueño o poseedor del predio donde se encuentran dichas aguas, sin prejuicio de poder otorgarle permiso de aprovechamiento a persona distinta del propietario para usos domésticos y de abrevadero, previo el acuerdo de servidumbres; igualmente establece la posibilidad de suspender definitiva o temporalmente el permiso de aprovechamiento cuando las aguas del subsuelo de una cuenca o de una zona, estén en peligro de agotamiento o contaminación o cuando las circunstancias hidrogeológicas que se tuvieron en cuenta para otorgarlas hayan cambiado sustancialmente.

El Decreto 1541 de 1978, en el Título III, Capítulo III, establece las disposiciones comunes, características y condiciones de las concesiones y procedimientos para otorgar estas concesiones; en el Título VII, Capítulo II, sobre aguas subterráneas y en la Sección II, artículos 155 a 164 sobre los aprovechamientos.

Finalmente, la Ley Según la Ley 99 de 1993, en su artículo 31, numeral 9, establece la competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales, para el otorgamiento de las concesiones de aguas subterráneas y en el mismo artículo, numeral 12, les otorga también funciones de seguimiento y control.

CAPÍTULO 2.

MODELO GEOLÓGICO Y GEOFÍSICO



2. MODELO GEOLÓGICO Y GEOFÍSICO

La búsqueda de aguas subterráneas abarca todos los estudios que deben realizarse para la ubicación y caracterización de las zonas que contengan agua en el subsuelo. Con el fin de realizar una exploración adecuada se debe seguir los pasos que se observan en la Ilustración 3.

Ilustración 3. Etapas que definen la exploración de agua subterránea

Fuente: Elaboración propia.

Las exploraciones y evaluaciones geológicas son de gran importancia para determinar las características de las rocas y estructuras geológicas del área interés y de esta manera conocer si existen condiciones favorables para el almacenamiento de agua subterránea. Por otra parte, la caracterización hidrogeológica permite identificar las zonas de Colombia con gran potencial hidrológico y las formaciones que presentan las características adecuadas para el almacenamiento de agua.

Finalmente, una vez que se ha seleccionado el lugar con las características hidrogeológicas idóneas, es importante realizar una prospección geofísica del suelo que está sujeta a procedimientos y conceptos que permiten la comprensión, la naturaleza, propiedades y funciones del suelo, como parte de un conjunto de un sistema se requiere un conocimiento básico en geología para lograr ese objetivo y una disponibilidad de información confiable sobre la morfología de los suelos y sus características obtenidas a través del estudio y la descripción en campo.

2.1. EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN GEOLÓGICA

Con el objetivo de identificar si la zona de interés tiene potencial hidrológico se debe realizar una caracterización geológica que comprenda una cartografía detallando la litología, su textura, porosidad y composición mineralógica. Esta información debe

apoyarse con fotografías aéreas, información de columnas estratigráficas.[7]

2.1.1 Identificación de la zona geológica

La geología es de gran importancia en la búsqueda de agua subterránea debido a que índica las condiciones favorables para su almacenamiento, como los tipos de rocas y las estructuras del subsuelo. Al realizar la caracterización, se recomienda seguir los siguientes pasos definidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en la Cartilla para la descripción de suelos:

- Realizar un registro y ubicación: debe comprender fecha, nombre de la persona encargada de la descripción, y ubicación.

- Determinar los factores formadores del suelo: incluye la descripción del clima, geoforma, identificación de la orientación de pliegues, de fallas y de los estratos presentes, uso de la tierra y vegetación.

- Delimitar de los estratos: comprende realizar la descripción de las unidades geológicas a nivel regional, En el caso de presencia de rocas ígneas y metamórficas, es necesario realizar una descripción de las estructuras, incluyendo, laminaciones, formas e intensidades del fracturamiento, así como las discontinuidades de los macizos rocosos[8]. Para cada una de las capas deben detallar los fragmentos rocosos, textura, color, estructura y densidad aparente.

- Identificar el ambiente geológico en el que se encuentra el área de estudio, es decir, las condiciones químicas, físicas y biológicas que pueden estar alterando o modificando las rocas, como la presencia de agua en sus diferentes formas, lluvia, ríos, lagunas, el aporte externo de sedimentos, la diferencia de temperatura, entre otros.

2.2. FUENTES DE INFORMACIÓN

En la caracterización geológica se deben utilizar diferentes estudios de referencia como planchas geológicas, columnas estratigráficas y fotografías aéreas, para realizar una correcta evaluación de la zona. Una de las fuentes de información por medio de la cual se puede obtener información geológica detallada de la zona que se está estudiando es el geoportal del Servicio Geológico Colombiano.

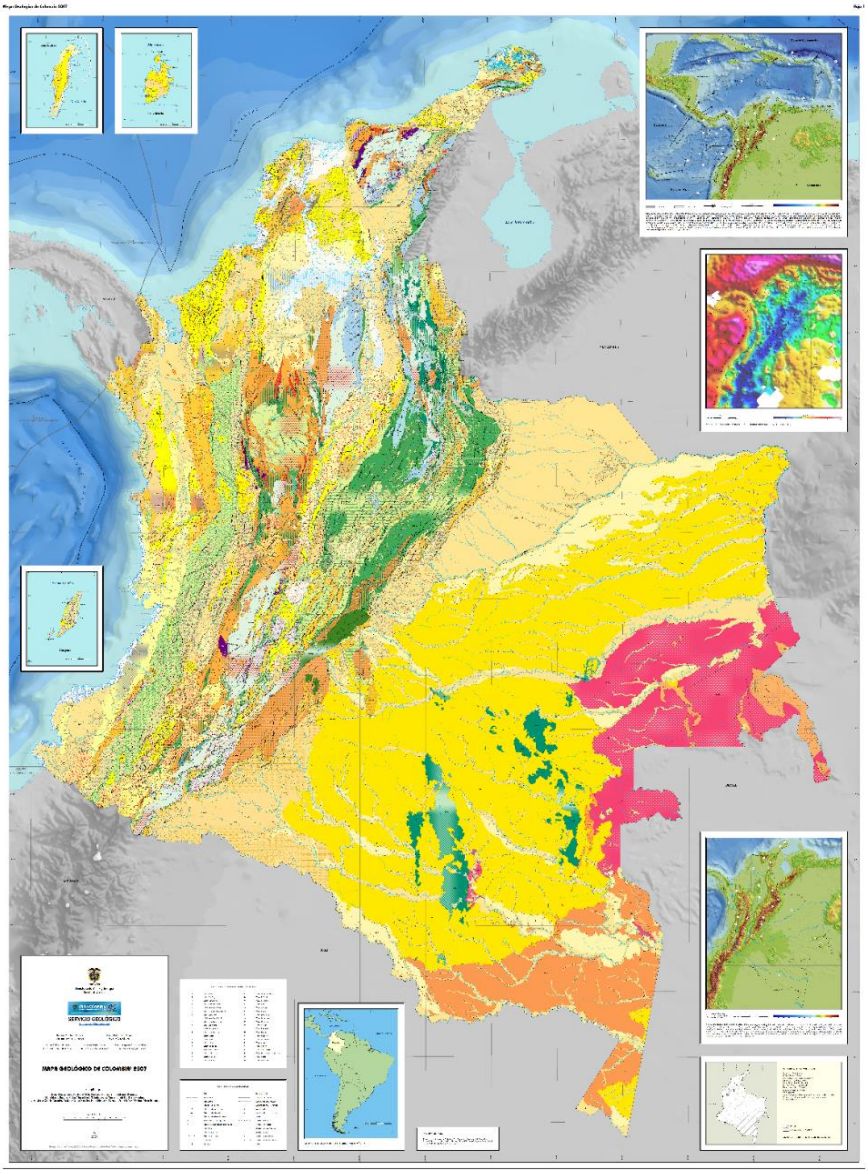
[7] VELEZ MARÍA, ORTÍZ CAROLINA, VARGAS MARIA. Las aguas subterráneas un enfoque práctico, 2011. Pág.55
[8] Ibid. Pág. 56

Por otra parte, el Instituto Agustín Codazzi cuenta con dos plataformas para la descarga de información, el primer portal es Colombia en Mapas, que permite descargar mapas con distinta información como geología, coberturas del suelo, cartografía histórica, entre otros. Y el segundo portal llamado Banco Nacional de Imágenes permite la descarga de fotografías aéreas.

2.2.1. MAPA GEOLÓGICO DE COLOMBIA

En la Ilustración 4, se puede observar el mapa geológico de Colombia que ha sido generado por el Servicio Geológico Colombiano.

Ilustración 4. Mapa Geológico de Colombia



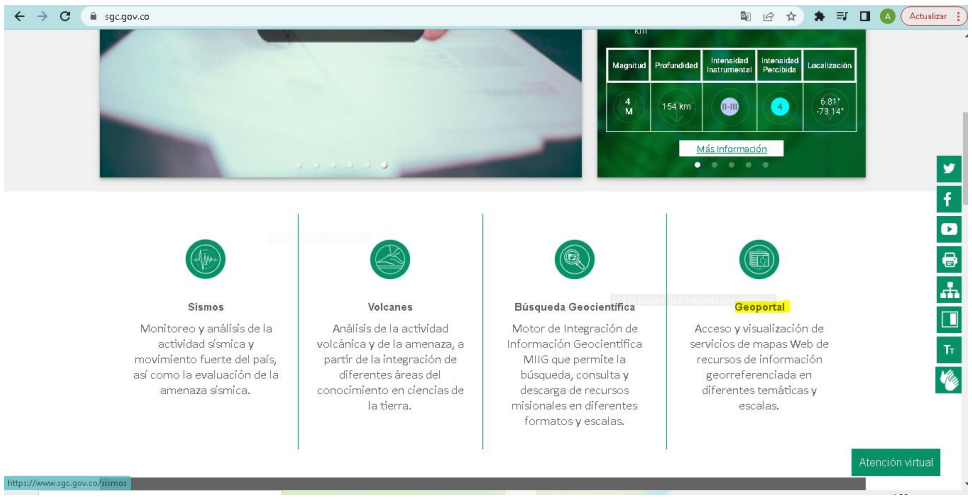
Fuente: Servicio Geológico Colombiano

2.2.1.1.1. Servicio Geológico Colombiano (SGC)

El Servicio Geológico Colombiano – SGC tiene a su disposición una base de datos para la descarga de las planchas geológicas de todo el territorio colombiano. A continuación, se describen los pasos que deben seguirse, para la obtención geológica del área de estudio.

1. Se debe ingresar a la página https://www.sgc.gov.co/ se selecciona Geoportal, como se observa en la Ilustración 5.

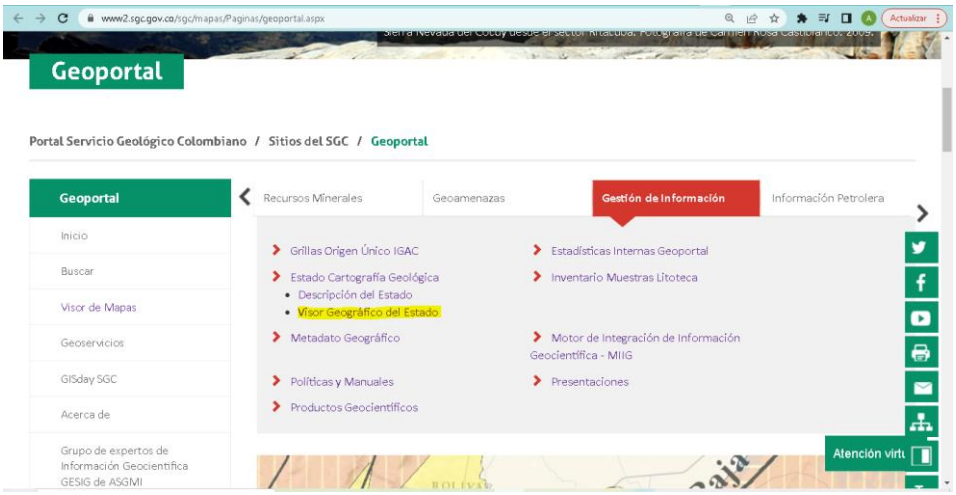
Ilustración 5. Paso 1 para la obtención de planchas geológicas del SGC



Fuente: Servicio Geológico Colombiano

2. Ingresamos a gestión de información y en esta sección hacemos clic en visor geográfico del Estado, como se observa en la Ilustración 6.

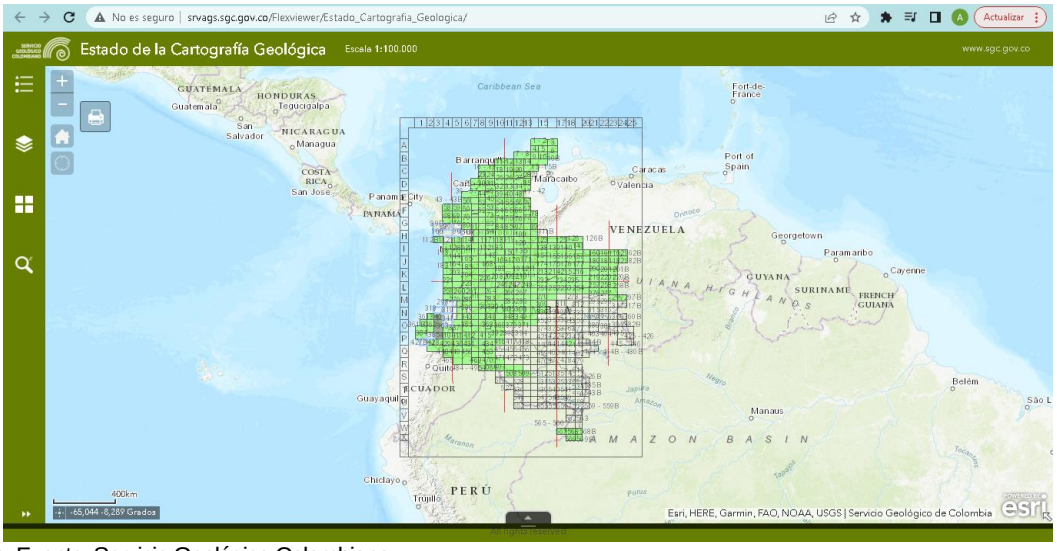
Ilustración 6. Paso 2 para la obtención de planchas geológicas del SGC



Fuente: Servicio Geológico Colombiano

3. Cuando se abre el visor geográfico, se encuentran todas las planchas geológicas de Colombia. Como se evidencia en la Ilustración 7, se debe identificar la plancha correspondiente al área de interés.

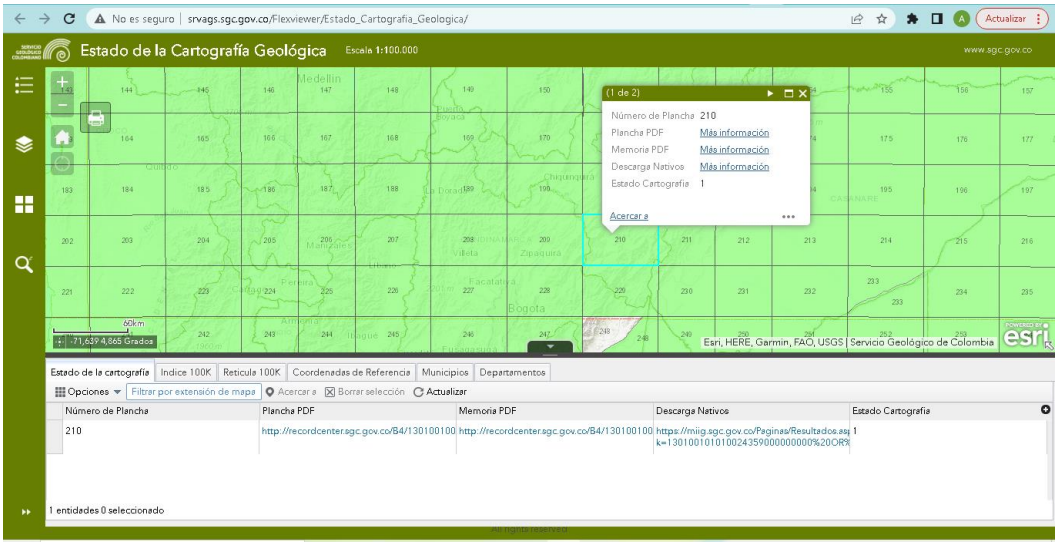
Ilustración 7. Paso 3 para la obtención de planchas geológicas del SGC



Fuente: Fuente: Servicio Geológico Colombiano

4. Como se observa en la Ilustración 8 luego de seleccionar la plancha geológica, en la parte inferior, aparecerán los documentos disponibles del área, que son la plancha geológica en PDF, la memoria geológica, (que explica detalladamente la geología de la zona) y los nativos, que son archivos shape que se pueden abrir en softwares como ArcGIS o QGIS.

Ilustración 8. Paso 4 para la obtención de planchas geológicas del SGC



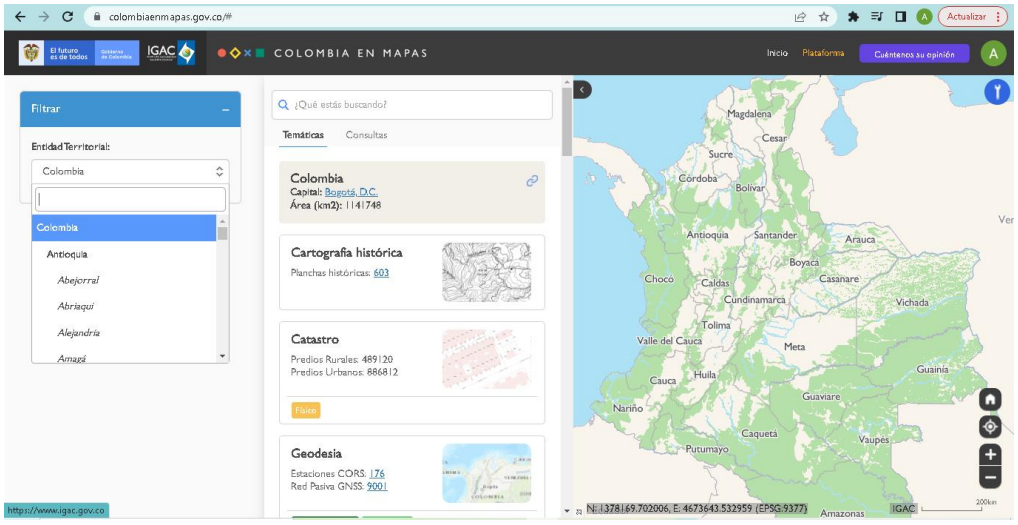
Fuente: Fuente: Servicio Geológico Colombiano

2.2.1.1.2. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI – IGAC

Para la descarga de mapas del IGAC, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Ingresar a la página https://www.colombiaenmapas.gov.co/. Como se puede notar en la Ilustración 9, en la parte izquierda se puede filtrar la búsqueda de acuerdo al municipio donde se encuentra la zona de estudio seleccionada.

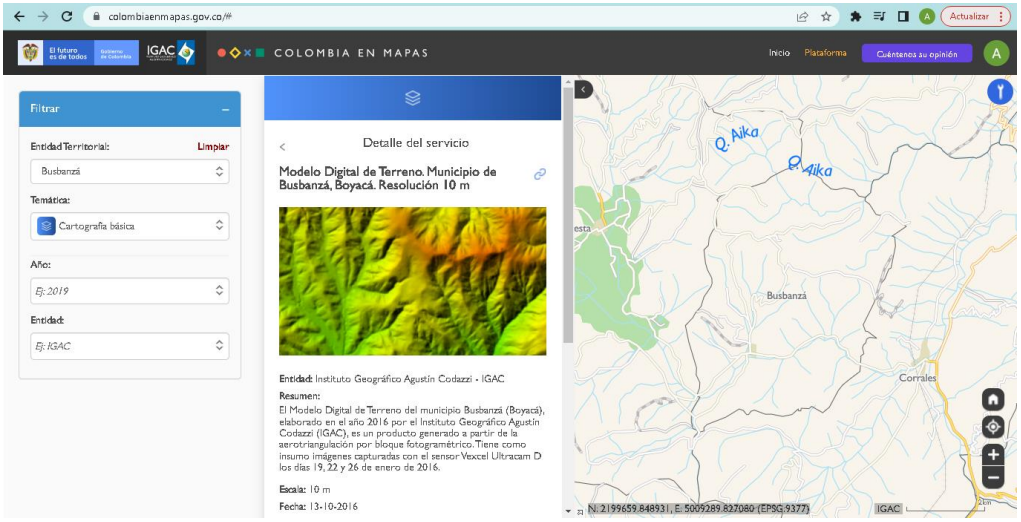
Ilustración 9. Paso 1 para la descarga de mapas del IGAC



Fuente: IGAC

2. Una vez se hayan encontrado todos los mapas disponibles, se seleccionan los de interés, como se muestra en la Ilustración 10.

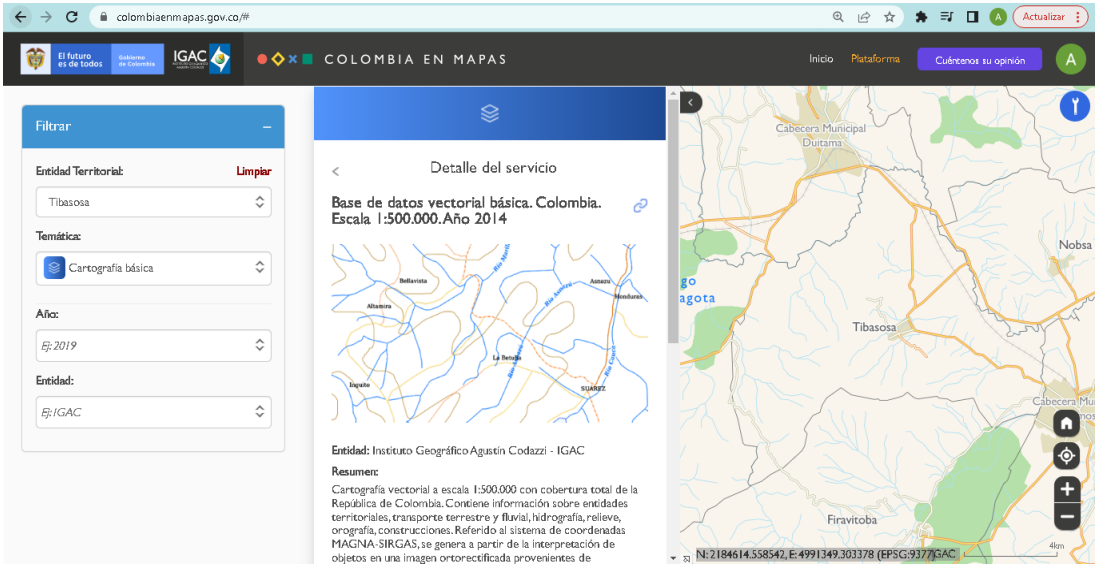
Ilustración 10. Paso 2 para la descarga de mapas del IGAC



Fuente: IGAC

3. En la Ilustración 11, se puede ver como se define en que formato se desea realizar la descarga, la mayoría de los mapas se encuentran en, PDF, GDB, Shapefile o Geopackage, estos últimos pueden ser visualizados en softwares como ArcGIS o QGIS.

Ilustración 11. Paso 3 para la descarga de mapas del IGAC



Fuente: IGAC

Por otro lado, para realizar la descarga de fotografías aéreas es necesario ingresar al Banco Nacional de Imágenes con el link http://bni.gov.co/, en la pestaña búsqueda de imágenes se encontrará la opción aerofotografías, allí se podrán observar las imágenes que se requieran, como se puede notar en la Ilustración 12.

Ilustración 12. Descarga de fotografías aéreas del Banco Nacional de Imágenes

Fuente**:** IGAC

2.3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Luego de haber realizado el reconocimiento de la geología regional del área que se está evaluando, es importante establecer la caracterización de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico, es decir, se debe identificar su capacidad de almacenar y permitir la circulación de agua.

2.3.1. CLASIFICACIÓN DE UNIDADES

Las formaciones geológicas se encuentran conformadas por diferente tipo de rocas, brindando una idea clara de la cantidad de agua que se puede captar debido a la rapidez con que esta ingresa a la formación, ya sea que provenga del proceso de percolación por precipitaciones o porque se transfiera de forma lateral cedido por otra formación geológica.

Las unidades geológicas se pueden clasificar en función de su capacidad para almacenar y transmitir agua como acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuífugos.

2.3.2. ACUÍFEROS

Su nombre proviene del latín fero que significa llevar, básicamente consiste en un tipo de formación geológica que tiene la capacidad de almacenar agua en su interior y ceder parte de la misma debido a su suelo permeable. No todas las formaciones presentan la capacidad de almacenar y transmitir agua. Este tipo de formaciones está compuesto generalmente por arenas, gravas, también granito u otra roca compacta que presente una fractura

importante.

En función de la estructura del acuífero se pueden clasificar en:

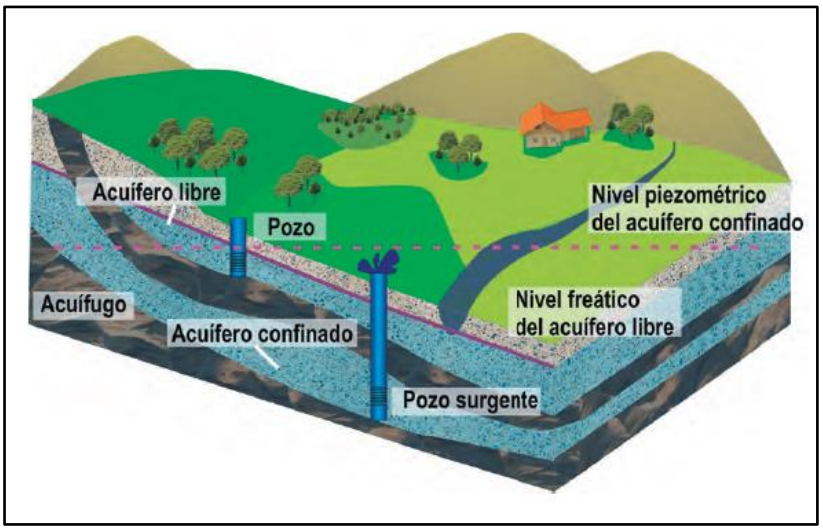
1. Acuíferos libres, no confinados o freáticos.
2. Acuíferos confinados, cautivos o a presión.
3. Acuíferos semiconfinados o semicautivos.

1.) Acuíferos libres, no confinados o freáticos: Son acuíferos cuyo piso es impermeable y su techo está a presión atmosférica. La recarga de este tipo de acuífero es directa y se realiza por infiltración del agua de lluvia a través de la zona no saturada o por infiltración de ríos o lagos. Son los más afectados en caso de sequía, ya que el nivel freático oscila con los cambios climáticos. Pozos muy someros se ven afectados (se secan), cuando el nivel freático desciende hasta por debajo de la profundidad total del pozo.

2.) Acuíferos confinados: Limitados en su parte superior por una formación de baja a muy baja permeabilidad. La presión hidrostática a nivel del techo del acuífero es superior a la atmosférica y la recarga es lateral. Cuando se realiza un pozo en este tipo de acuíferos, el agua contenida en ellos asciende rápidamente por su interior. Si el agua alcanza la superficie, al pozo se le llama surgente. Superficie potenciométrica se le denomina al nivel de agua virtual que se genera cuando se integran todos los niveles hidráulicos observados en los pozos del acuífero confinado.

3.) Acuíferos semiconfinados: Son mucho más frecuentes en la naturaleza que los cautivos. En estos, el techo, el piso o ambos, están formados por capas de baja permeabilidad que si bien dificultan no impiden la circulación vertical del agua. Para que ello suceda, además de la permeabilidad, deben existir diferencias de carga o potencial hidráulico entre el acuífero semiconfinado y otro superior o inferior. Los acuíferos semiconfinados se recargan y descargan a través de las unidades de baja permeabilidad denominadas semiconfinantes, filtrantes o Acuitardo. En la Ilustración 13 se observa un ejemplo de acuífero semoconfinado.

Ilustración 13. Acuíferos Semiconfinados



Fuente: Manual de Agua Subterránea

En función del tipo de porosidad se clasifican:

1.) Acuíferos de porosidad primaria, porosos o sedimentarios.
2.) Acuíferos de porosidad secundaria, fisurados o fracturados.
3.) Acuíferos por disolución, químicos o kársticos.

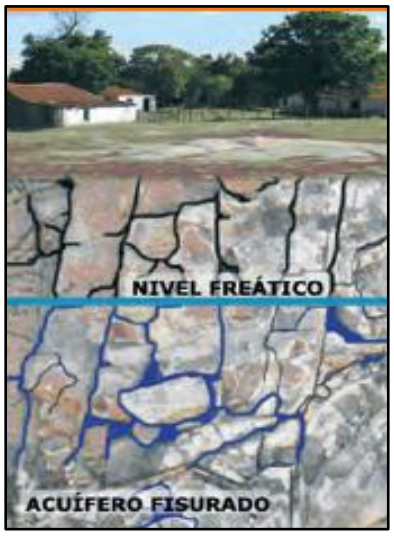
1.) <u>Acuíferos de porosidad primaria o poroso:</u> Constituidos por formaciones geológicas sedimentarias. Los materiales suelen ser gravas y principalmente arenas, que varían su composición y tamaño en función de su origen geológico (fluvial, eólico, lacustre, glacial, etc.). Estos materiales pueden estar sueltos o no consolidados (generalmente son formaciones recientes, de edad cuaternaria) o consolidado. En la Ilustración 14, se observa un ejemplo de acuífero poroso.

Ilustración 14. Acuífero poroso

Fuente: Manual de Agua Subterránea

Acuíferos de porosidad secundaria o fisurado: Formados por rocas “duras” de origen ígneo o metamórfico. La porosidad en estos acuíferos viene dada por la presencia de zonas de alteración, fracturas, fallas o diaclasas, única forma que tiene el agua de almacenarse y de circular, como se puede notar en la Ilustración 15. Hay que tener en cuenta que para que el agua pueda circular, estas fracturas tienen que estar abiertas y comunicadas.

Ilustración 15. Acuífero Fisurado



Fuente: Manual de Agua Subterránea

2.) Acuíferos kársticos por disolución: Compuestos por rocas de origen carbonatico (calizas, margas, dolomías), donde la porosidad (huecos y cavernas) se desarrollan en forma secundaria por disolución del carbonato. El agua en estos acuíferos circula por entre los huecos con una velocidad mayor que en los acuíferos porosos o fracturados, como se puede evidenciar en la Ilustración 16.

Ilustración 16. Acuífero Kárstico

Fuente: Manual de Agua Subterránea

2.3.3. ACUITARDOS

Su nombre proviene del latín tardo que significa retardar o impedir, este tipo de formación geológica contiene una cantidad de agua apreciable, la cual circula a través de la ella con dificultad, es un concepto intermedio entre el acuífero y el acuicludo.

Dentro de este tipo de formaciones se puede encontrar arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderada, a continuación, se presenta un ejemplo de este tipo de formaciones.

2.3.4. ACUICLUDOS

Este es un tipo de formación que su nombre proviene del latín cludo que significa encerrar, en este tipo de formaciones se puede encontrar agua en una cantidad apreciable, en la cual no es posible circular a través de ella. Un ejemplo de suelo de este tipo de formaciones son los limos y arcillas.

Si se compara 1 m^3 de arcillas respecto a 1 m^3 de arena, en la arcilla encontramos un contenido mayor de agua en el mismo volumen, pero el agua se encuentra atrapada y no puede salir por gravedad. Por lo cual no podrá circular en el subsuelo ni de forma natural hacia un pozo que se esté bombeando.

2.3.5. ACUIFUGO

Este es un tipo de formación que no contiene agua porque no cuenta con la capacidad de permitir que circule agua a través de ella, su nombre proviene del latín fugo que significa rechazar, ahuyentar. Un ejemplo de este tipo de formaciones es el granito o esquisto inalterados y no fracturados.

De acuerdo con las características anteriormente mencionadas, los acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuífugos, se encuentran asociados a distintos tipos de formaciones geológicas y se clasifican en función a su capacidad de almacenar agua, de drenarla y de transmitirla como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación hidrológica

Clasificación hidrológica	Capacidad de almacenar	Capacidad de drenar	Capacidad de transmitir	Formaciones características
Acuífero	ALTA	ALTA	ALTA	Gravas, arenas, calizas
Acuitardo	ALTA	MEDIA/BAJA	BAJA	Limos, arenas limosas y arcillas
Acuícludo	ALTA	MEDIA/BAJA	NULA	Arcillas
Acuífugo	NULA	NULA	NULA	Granitos, gneises, mármoles

Fuente: Acuíferos, estructuras y tipos

Otro parámetro fundamental en las aguas subterráneas es el de la porosidad, ya que con su medida se puede conocer que tan rápido se puede desplazar el agua a través de los diferentes intersticios del estrato, de acuerdo con esto se consigue realizar una caracterización de las propiedades intergranulares para algunas rocas como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4 Valores de porosidades intergranulares para algunas rocas

Materiales		Porosidad % m					Porosidad eficaz m_e			Obs erv
Tipo	Descripción	Media	Nor. Máx	Nor Mín	Ext Máx	Ext. Mín	Media	Máx	Mín	
Rocas masivas	Granito	0,3	4	0,2	9	0,05	<0,2	0,5	0	A
	Caliza masiva	8	15	0,5	20		<0,5	1	0	B
	Dolomia	5	10	2			<0,5	1	0	B
Rocas metamórficas		0,5	5	0,2			<0,5	2	0	A

Materiales		Porosidad % m					Porosidad eficaz m_e			Obs erv
Tipo	Descripción	Media	Nor. Máx	Nor Mín	Ext Máx	Ext. Mín	Media	Máx	Mín	
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobas	30	50	10	60	5	<5	20	0	C,E
	Escorias	25	80	10			20	50	1	C,E
	Pumitas	85	90	50			<5	20	0	D
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0,1			<1	2	0,1	A
	Basaltos vacuolares	12	30	5			5	10	1	C,E
Rocas sedimentarias consolidadas (ver rocas masivas)	Pizarras sedimentarias	5	15	2	30	0,5	<2	5	0	E
	Areniscas	15	25	3	30	0,5	10	20	0	F
	Creta blanda	20	50	10			1	5	0,2	B
	Caliza detrítica	10	30	1,5			3	20	0,5	
Rocas sedimentarias sueltas	Aluviones	25	40	20	45	15	15	35	5	E
	Dunas	35	40	30			20	30	10	
	Gravas	30	40	25	40	20	25	35	15	
	Loess	45	55	40			<5	10	0,1	E
	Arenas	35	45	20			25	35	10	
	Depósitos glaciares	25	35	15			15	30	5	
	Limos	40	50	35			10	20	2	E
	Arcillas sin compactar	45	60	40	85	30	2	10	0	E
	Suelos superiores	50	60	30			10	20	1	E

Fuente: Las aguas subterráneas, un enfoque práctico. INGEOMINAS

Donde,

A: aumenta m y me por meteorización.
B: Aumenta m y me por fenómenos de disolución.
C: disminuye m y me con la edad.
D: disminuye m y puede aumentar me con la edad.
E: me muy variable según circunstancias y tiempo.
F: variable según el grado de cementación y su solubilidad.

2.3.6. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN COLOMBIA

Una vez que se ha identificado la geología del área, y la clasificación que presentan las formaciones geológicas de acuerdo a su capacidad de almacenar y transmitir agua, es importante definir, la provincia hidrogeológica en la que se encuentra la zona de estudio con el fin de determinar el potencial hidrogeológico y las formaciones que pueden contener agua.

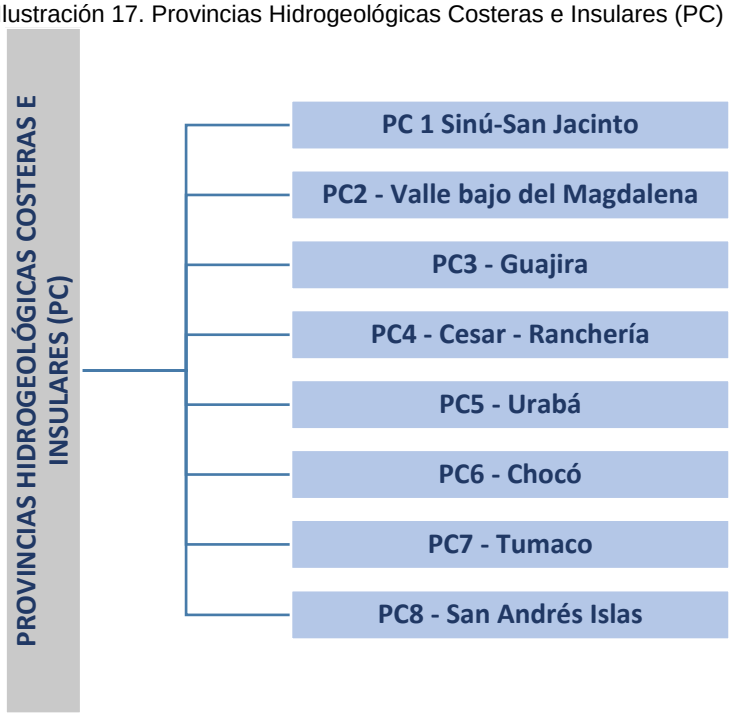
El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM en el Estudio Nacional del Agua – ENA, en el año 2010 delimitó 16 provincias hidrogeológicas, con base en el mapa geológico de Colombia, las características geomorfológicas y las condiciones hidrogeológicas. En estas provincias se clasifican las unidades litoestratigráficas en acuíferos, acuitardos, acuitardos y acuifugas.

Las provincias hidrogeológicas se agrupan a su vez en tres grupos de acuerdo a su ubicación geográfica, que son las provincias hidrogeológicas costeras e insulares (PC), las provincias hidrogeológicas perticratónicas (PP) y las provincias hidrogeológicas montanas e intramonas (PM).

Actualmente, se considera que el volumen total de aguas subterráneas en Colombia es aproximadamente 5.848 km^3, de acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, 20.7% de este volumen pertenece a las provincias hidrogeológicas, costeras, insulares y costeras, el 53 % a las provincias hidrogeológicas perticratónicas y el 26.3% a las provincias hidrogeológicas perticratónicas.

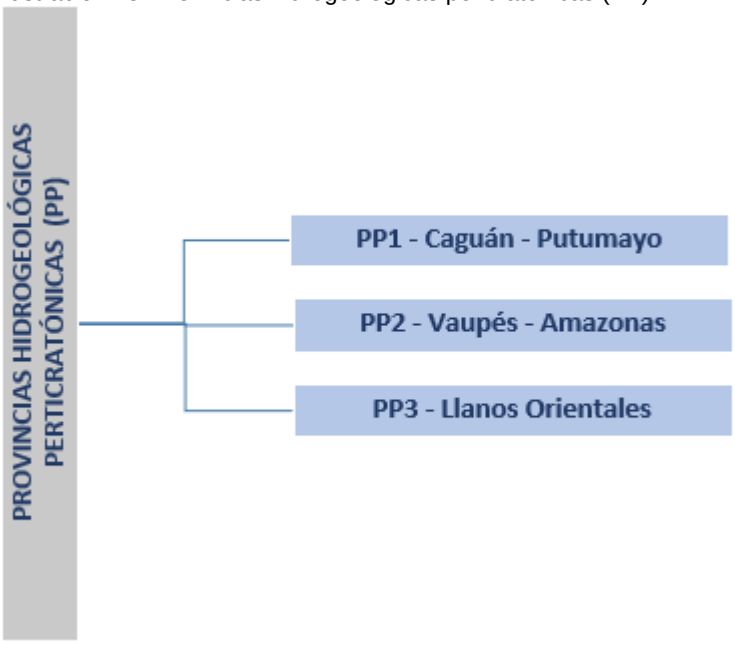
La agrupación de las provincias hidrogeológicas se puede observar en la Ilustración 17, Ilustración 18 e Ilustración 19.

Ilustración 17. Provincias Hidrogeológicas Costeras e Insulares (PC)



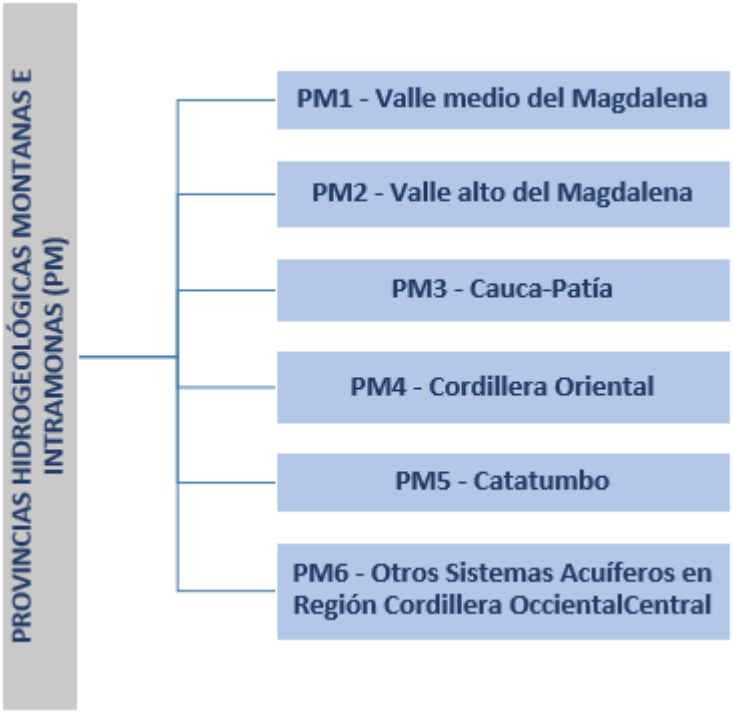
Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

Ilustración 18. Provincias hidrogeológicas pericratónicas (PP)



Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

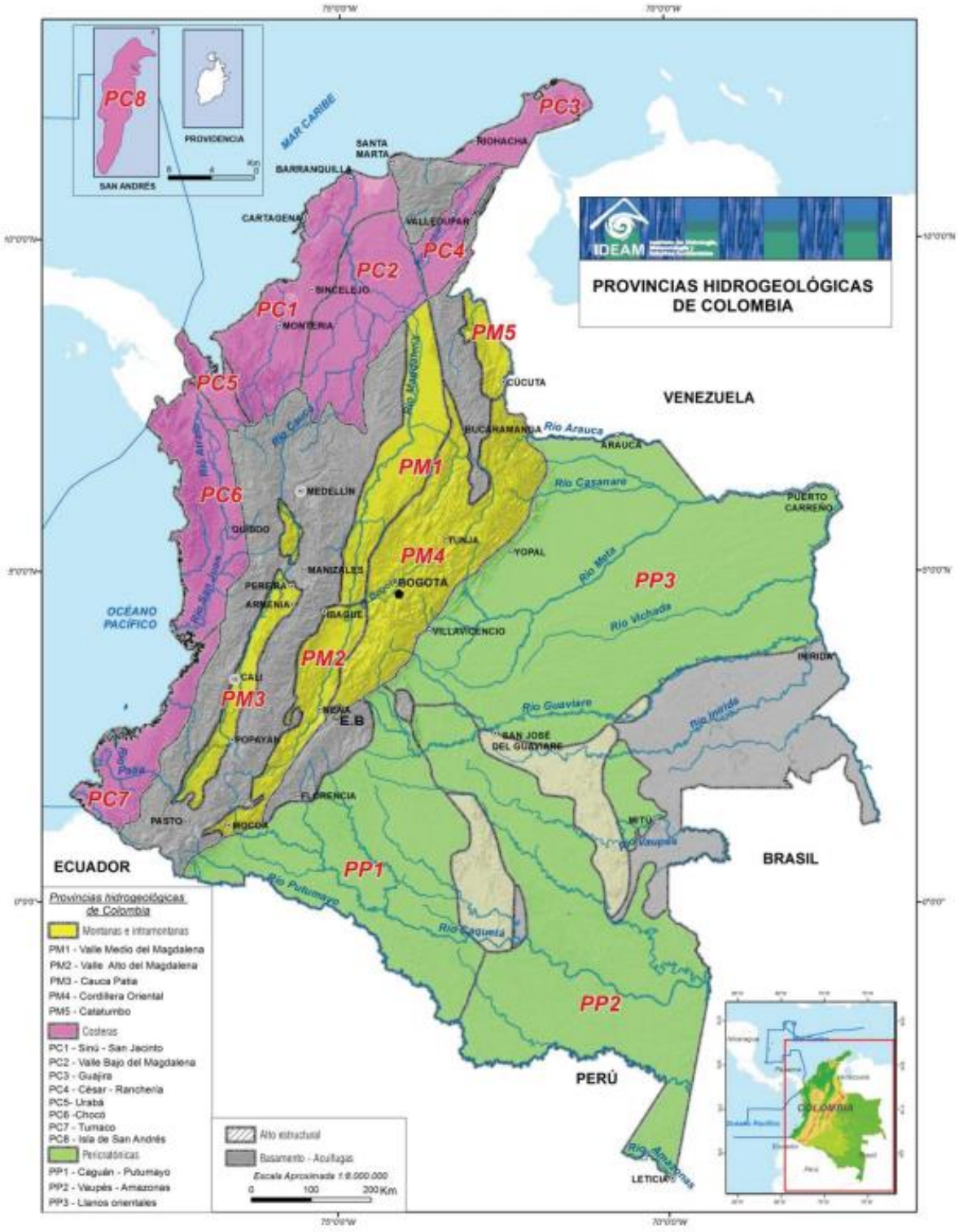
Ilustración 19. Provincias hidrogeológicas montanas e intramontanas (PM)



Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

En la Ilustración 20, se puede observar la delimitación establecida por el IDEAM para las provincias hidrogeológicas.

Ilustración 20. Provincias hidrogeológicas de Colombia



Fuente: IDEAM

- **PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA SINÚ-SAN JACINTO**

La provincia Sinú-San Jacinto, se encentra en el suroccidente de Colombia, tiene una extensión de 37.770,88 km², y está conformada por siete sistemas de acuíferos que son:

- Sistema Acuífero Sincelejo-Morroa
- Sistema Acuífero Golfo de Morrosquillo
- Sistema Acuífero Arroyo-Grande
- Sistema Acuífero Turbaco
- Sistema Acuífero Barranquilla-Sabanalarga
- Sistema Acuífero Santa Marta
- Sistema Acuífero Montería Ciénaga de Oro

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 970 m con aproximadamente 19.40 $*10^{10}$ m^3 de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Morroa, Sincelejo, Ciénaga de Oro, San Cayetano, que están compuestas principalmente de Sedimentos arenosos y de gravas, areniscas. En la Tabla 5, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 5. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Sinú-San Jacinto

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA DE LA PROVINCIA SINÚ-SAN JACINTO	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
	Morroa Sincelejo	Areniscas y conglomerados	Acuífero porosidad primaria
		Areniscas y lutitas	Acuífero porosidad secundaria
	Tubara	Lutitas	Acuitardo
	Carmen	Areniscas y lutitas	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	Ciénaga de Oro	Lutitas, areniscas y calizas.	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	San Jacinto	Lutitas y calizas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Tolú Viejo	Areniscas y Calizas	Acuífero porosidad secundaria
	San Cayetano	Areniscas y lutitas	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	Cansona	Lutitas	Acuífuga

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA VALLE BAJO DEL MAGDALENA

La provincia Valle Bajo del Magdalena limita al oriente con la Falla Santa Marta-Bucaramanga, al sur con e las cordilleras Central y Occidental y al norte con el sistema de fallas de Romeral, tiene una extensión de 44,917.64 km², y está conformada por dos sistemas de acuíferos que son:

- Sistema Acuífero Banco-Mompox
- Sistema Acuífero Monjana

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 900 m con aproximadamente 36.22 $*10^{10}$ m³ de reservas y en términos generales son acuíferos libres a confinados.

Las formaciones de mayor interés el grupo Tubará-Porquero compuesto por sedimentos arenosos, la formación Corpa compuesta por Arenitas, arenitas conglomeráticas y los sedimentos de terraza aluviales recientes. En la Tabla 6, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 6. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Valle Bajo del Magdalena

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA DE LA PROVINCIA VALLE BAJO DEL MAGDALENA	Formación		Litología Predominante	Clasificación hidrológica
	Unidad detrítica del Popa		Depósitos recientes de abanicos y terrazas	Acuífero porosidad primaria
	Corpa		Arenitas, arenitas conglomeráticas, y conglomerados arenosos polimícticos.	Acuífero porosidad primaria
				Acuitardo
	Tubará		Areniscas intercaladas con niveles conglomeráticos. Presenta algunos niveles de shales intercalados hacia la parte inferior	Acuífero porosidad primaria
				Acuitardo
	Porquero	Alta	Shales, con delgadas intercalaciones de areniscas y conglomerados hacia la parte superior.	Acuitardo
		Baja		Acuífero porosidad primaria
	Ciénaga de Oro	Alta	Areniscas calcáreas, calizas arenosas, calizas con algas rojas y foraminíferos.	Acuífero porosidad primaria
		Baja		Acuitardo

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA GUAJIRA

La provincia Guajira se encuentra en el nororiente de Colombia, limita al sur con la falla de Oca, al oriente con Venezuela y al norte y al occidente con el mar Caribe, cuenta con un área de 13,323.08 km² y está conformada por tres (3) sistemas acuíferos que son:

- Sistema Acuífero Maicao
- Sistema Riohacha-Manaure
- Sistema Acuífero Alta Guajira

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 580 m con aproximadamente $9.99*10^{10}$ de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Uitpa, Macarao y las unidades recientes depósitos de llanura aluvial. En la Tabla 7, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 7. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Guajira

	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA LA GUAJIRA	Castilletes	Shales negros y calizas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Jimol	Calizas arenosas, areniscas calcáreas y arcillolitas. Localmente calizas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Uitpa	Shales negros y calizas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Siamana	Arcillolitas grises e intercalaciones de calizas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Macarao	Arcillolitas, bancos de areniscas y calizas arenosas	Acuífero porosidad primaria
	Guaramalai	Calizas de color negro, shales calcáreos	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	La Luna	Lutitas carbonosas, limolitas y arcillolitas carbonosas y calizas negras bituminosas.	Acuífero porosidad secundaria
			Acuitardo
	GP. Cocollo	Calizas con intercalaciones de lutitas carbonosas	Acuífero porosidad secundaria
			Acuitardo
	GP. Yuruma	Margas y shales fosilíferas y calizas	Acuífero porosidad secundaria
			Acuitardo
	Palanz	Areniscas, conglomerados y calizas. Abundante en las calizas	Acuífero porosidad secundaria

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA CESAR- RANCHERÍA

La provincia Cesar- Ranchería limita al sur con la Falla Bucaramanga-Santa Marta, al norte con la falla de Oca, y al oriente con la serranía de Perijá, cuenta con un área de 10,099.79 km² y está conformada por dos sistemas acuíferos que son:

- Sistema Acuífero Cesar
- Sistema Acuífero Ranchería

De acuerdo con el ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 1,470 m con aproximadamente $14*10^{10}$ m³ de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Aguas blancas, Molino, Barco y depósitos de llanura aluvial. Los acuíferos libres se encuentran en los depósitos recientes. En la Tabla 8, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 8. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Cesar-Ranchería

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA CESAR-RANCHERÍA	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
		Depósitos aluviales integrados por guijarros, gravas, arenas, con algunas intercalaciones de arcillas.	Acuífero porosidad primaria
			Acuífero porosidad secundaria
	La Jagua	Shales, areniscas y mantos de carbón	Acuitardo
	Barco	Areniscas arcillosas, conglomerados arenosos y arcillolitas.	Acuífero porosidad primaria
	Molino	Lutitas con intercalación de calizas, y lodolita.	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Laja / La Luna	Limolitas calcáreas intercaladas lutitas.	Acuitardo
	Aguas Blancas	Areniscas de grano muy fino intercaladas con arcillolitas y calizas.	Acuífero porosidad secundaria
			Acuitardo
	Lagunitas	Calizas fosilíferas	Acuífero porosidad secundaria
	Río Negro	Cuarzo arenitas de grano grueso, areniscas y conglomerado.	Acuífero porosidad primaria
	La Quinta	intercalaciones de limolitas y estratos volcanoclásticos	Acuífuga
	Gp. Cachiri	Predominantemente calizas con areniscas y lutitas.	Acuífero porosidad secundaria

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA URABÁ

La provincia Urabá está delimita por las fallas de Uramita, limita al occidente con Panamá y al norte con el mar Caribe, cuenta con un área de 5264.43 km² y está conformada por un sistema acuífero que es:

- Sistema Acuífero Golfo de Urabá

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 250 m con aproximadamente $0.79*10^{10}$ m³ de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Ciénaga de Oro, Floresante, Tubara y depósitos de llanura aluvial. Los acuíferos libres se encuentran en los depósitos recientes. En la Tabla 9, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 9. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Urabá

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA DE LA PROVINCIA URABÁ	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
	Corpa	Areniscas lutitas y conglomerados	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	Tubara	Areniscas y lutitas	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	Floresante Porquero	Lutitas y conglomerados con niveles arenosos	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	Ciénaga de Oro - San Jacinto	Lutitas y areniscas y calizas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	San Cayetano	Lutitas areniscas y calizas	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	Cansona	Lutitas y conglomerados	Acuitardo

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA CHOCÓ

La provincia Choco se encuentra en el extremo noroccidental de Colombia, limita al occidente con el Océano Pacífico, y al norte con Panamá y al sur con la Falla de Garrapatas, cuenta con un área de 31,762.53 km² y está conformada por un sistema acuífero que es:

- Sistema Acuífero Valles Aluviales

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 800 m con aproximadamente $43.86*10^{10}$ m³ de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Quibdó, Munguidó y depósitos de sedimentos fluviales. Los acuíferos libres se encuentran en los depósitos recientes. En la Tabla 10, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 10. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Choco

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA CHOCO	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
		Sedimentos fluviales	Acuífero porosidad primaria
	Quibdó	Areniscas	Acuífero porosidad secundaria
	Munguidó	Lodolitas con areniscas	Acuífero porosidad secundaria
	Sierra	Limolitas y lodolitas	Acuitardo
	Napipi	Lodolitas calcáreas y calizas	Acuitardo
	Uva	Calizas con lodolitas	Acuitardo
	Salaquí	Calizas y chert	Acuitardo
	Barroso	Basaltos	Acuífuga

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA TUMACO

La provincia Tumaco se encuentra al suroccidente de Colombia, tiene un área de 23,749.42 km². De acuerdo al Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 570 m con aproximadamente $7.18*10^{10}$ m³ de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones San Agustín, Tumaco Raposo, depósitos de sedimentos fluviales y de playa. En la Tabla 11, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 11. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Tumaco

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA TUMACO	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
		Sedimentos fluviales y playa	Acuífero porosidad primaria
	San Agustín	Areniscas y arcillas	Acuífero porosidad primaria
	Tumaco	Lutitas, areniscas y calizas	Acuífero porosidad primaria
	Suruco	Calizas, chert, areniscas	Acuitardo
	Buenaventura	Areniscas y Arcillolitas	Acuitardo
	Cayapes	Arcillas	Acuitardo
	Raposo	Secuencias fluviátiles	Acuífero porosidad secundaria
	Mallorquín	Areniscas y arcillas	Acuífero porosidad secundaria
	Chaguí	Arcillolitas arcillolitas limolitas	Acuífero porosidad secundaria
	Grupo Diabásico	Basaltos	Acuífuga

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA SAN ANDRÉS

La provincia San Andrés tiene una extensión de 25 km². De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 90 m con aproximadamente $0.00196*10^{10}$ m³ de reservas. Las formaciones de interés son San Luis y San Andrés. En la Tabla 12, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia

Tabla 12. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia San Andrés

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA SAN ANDRÉS	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
		Depósitos de playa, derrubios y caliche	Acuífero porosidad primaria
	San Luis	Calizas y calciarenitas	Acuífero porosidad primaria
			Acuífero porosidad secundaria
	San Andrés	Calizas	Acuífero porosidad primaria

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA CAGUÁN – PUTUMAYO

La provincia Caguán-Putumayo se encuentra en el extremo sur de Colombia, limitando con Perú y Ecuador, cuenta con un área de 140,000 km² y está conformada por un sistema acuífero que es:

- Sistema Acuífero Valles aluviales y terrazas de grandes ríos

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 360 m con aproximadamente $66.11*10^{10}$ m³ de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Caimán, Caballos, Pepino y depósitos de sedimentos aluviales. En la Tabla 13, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 13. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Caguán-Putumayo

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA CAGUÁN.PUTUMAYO	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
	Caimán	Gravas de origen aluvial	Acuífero porosidad primaria
	Ospina	Lutitas e intercalaciones de areniscas.	Acuífero porosidad primaria
	Orito Belén	lutitas, lodolitas y capas delgados de carbón.	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	Orteguaza	Lutitas y areniscas	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	Pepino	Estratos de conglomerados con intercalaciones de lodolitas y limolitas	Acuífero porosidad primaria
	Rumiyaco	Lutitas, con intercalaciones de arenitas cuarzosas y niveles calcáreos	Acuitardo
	Villeta	Lodolitas intercaladas en estratos de caliza y cuarzoarenitas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Caballos	Cuarzoarenitas, arenitas conglomeráticas, conglomerados y arenitas.	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	Saldaña	Secuencia volcanosedimentaria, tobas, flujos de lava, aglomerados y limolitas	Acuitardo
	Payande Basamento cristalino	Secuencias de calizas micríticas.	Acuífero porosidad secundaria
			Acuífuga

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA VAUPÉS-AMAZONAS

La provincia Vaupés- Amazonas se encuentra al suroriente de Colombia, limitando con Perú y Brasil, cuenta con un área de 126,050.61 km² y está conformada por un sistema acuífero que es:

- Sistema Acuífero Valles aluviales y terrazas de grandes ríos

De acuerdo con el Estudio Nacional del Ena – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 250 m con aproximadamente $2.42*10^{10}$ m³ de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Serranía, Araracuara y depósitos de sedimentos aluviales. En la Tabla 14, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 14. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Vaupés-Amazonas

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA DE LA PROVINCIA VAUPÉS-AMAZONAS	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
		Depósitos aluviales y terrazas.	Acuífero porosidad primaria
	Mari - terciario sup – am	Lutitas	Acuitardo
	Serranía	Areniscas y conglomerados	Acuífero porosidad primaria
	Losada-Terciario	Areniscas, lutitas y conglomerados	Acuífero de porosidad secundaria
	Guayabero	Lutitas	Acuitardo
	Macarena	Areniscas y lutitas	Acuífero porosidad secundaria
			Acuitardo
	Farallones	Calizas	Acuífero porosidad secundaria
	Araracuara	Areniscas, lititas y conglomerados.	Acuífero porosidad secundaria
	Complejo migmátitico del meta	Rocas metamórficas, granitoides y vulcanoclásticas	Acuifuga

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA LLANOS ORIENTALES

La provincia Llanos Orientales se encuentra al centrooriente de Colombia, limita al norte y al oriente con Venezuela y al occidente con el Piedemonte llanero. Cuenta con un área de 265,547.29 km² y está conformada por tres sistemas acuíferos que son:

- Sistema Acuífero Villavicencio-Granada-Puerto López
- Sistema Acuífero Yopal Tauramena
- Sistema Acuífero Arauca- Arauquita

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 550 m con aproximadamente $239.06*10^1$ m³ de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Farallones, Guadalupe y depósitos de sedimentos aluviales. En la Tabla 15, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 15. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Llanos orientales

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA LLANOS ORIENTALES	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
	Farallones	Gravas semiconsolidadas. Areniscas con intercalaciones de lutitas. Areniscas en la formación caja.	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	León	Lutitas con delgadas intercalaciones de areniscas.	Acuitardo
	Carbonera	Areniscas con intercalaciones de lutitas.	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	Guadalupe	Areniscas cuarzosas con intercalaciones de lutitas	Acuífero porosidad primaria
	K1 Medio Inferior	Lutitas Fisiles.	Acuitardo
	K2	Areniscas cuarzosas bien cementadas con delgadas intercalaciones de lutitas.	Acuífero porosidad secundaria

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

La provincia Valle medio del Magdalena limita al suroriente, con el sistema de fallas Bituima-La Salina, al nororiente, limita con el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta. Cuenta con un área de 27,533.52 km² y está conformada por tres sistemas acuíferos que son:

- Sistema Acuífero Nare-Berrio-Yondó
- Sistema Acuífero Mariquita-Dorada-Salgar
- Sistema Acuífero Simití

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 3500 m con aproximadamente $26.08*10^{10}$ m^3 de reservas. Las formaciones de mayor interés son la formación Mesa, el grupo Real y depósitos de sedimentos aluviales. En la Tabla 16, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 16. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Valle Medio del Magdalena

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA DE LA PROVINCIA VALLE MEDIO DEL MAGDALENA	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
		Depósitos aluviales recientes	Acuífero porosidad primaria
	Mesa	Conglomerados, lutitas y areniscas. Depósitos fluviales	Acuífero porosidad primaria
	GP. Real	Areniscas, lutitas y conglomerados. Sedimentitas.	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	LA Cira Shale	Shales	Acuitardo
	Colorado	Lutitas y areniscas localmente conglomeráticas.	Acuitardo
	Mugrosa	Areniscas y lodolitas con niveles carbonosos.	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	La Paz	Areniscas carbonosas y lutitas con capas de carbón.	Acuífero porosidad primaria
	Umir	Lutitas, calizas, areniscas	Acuitardo
	La Luna	Lutitas, calizas, areniscas	Acuitardo
	Tablazo	Calizas, lutitas e intercalaciones de arenisca.	Acuífero porosidad secundaria
	Paja	Lutitas, areniscas arcillosas y shales negros.	Acuífero porosidad secundaria
			Acuitardo
	Rosablanca	Calizas y margas grises con intercalaciones de shale.	Acuífero porosidad secundaria
	Cumbre		Acuífero porosidad secundaria
	Los Santos	Areniscas, limolitas, calizas y lutitas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Girón	Areniscas y limolita rojiza	Acuífero porosidad secundaria

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA VALLE ALTO DEL MAGDALENA

La provincia Valle alto del Magdalena limita al nororiente, está delimitada por el sistema de fallas Bituima-La Salina y limita al sur con el Macizo Colombiano. Cuenta con un área de 14,686.77 km² y está conformada por tres sistemas acuíferos que son:

- Sistema Acuífero Ibagué
- Sistema Acuífero Purificación - Saldaña
- Sistema Acuífero Neiva-Tatacoa

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 850 m con aproximadamente $11.11*10^{10}$ m³ de reservas. Las formaciones de mayor interés son las formaciones Honda, Gigante, Guacallo y depósitos recientes de abanicos. En la Tabla 17, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 17. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Valle Alto del Magdalena

CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA DE LA PROVINCIA VALLE ALTO DEL MAGDALENA	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
		Depósitos recientes de abanicos y terrazas	Acuífero porosidad primaria
	Guacacallo	Gravas, tobas y lavas	Acuífero porosidad primaria
	Lahar De Altamira	Gravas y flujos piroclásticos.	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	Gigante	Gravas y arenas.	Acuífero porosidad primaria
	Honda	Conglomerados y areniscas	Acuífero porosidad primaria
	Doima	Areniscas y conglomerados.	Acuífero porosidad primaria
	Potrerillo	Lutitas	Acuitardo
	Chicoral	Conglomerados.	Acuífero porosidad primaria
	Guadala	Lutitas y areniscas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Monserrate	Areniscas y lutitas.	Acuífero porosidad secundaria
			Acuitardo
	Villeta	Areniscas, lutitas y calizas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Caballos	Areniscas.	Acuífero porosidad secundaria
	Yari	Areniscas y lutitas	Acuífero porosidad secundaria
			Acuitardo
	Payandé	Calizas, vulcanitas y lutitas,	Acuitardo
	Imán e Hígado		
	Grupo Cajamarca	Filitas y esquistos	Acuífuga
	Precámbrico	Macizo de Garzón	

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA CAUCA PATÍA

La provincia Cauca Patía, se ubica en el centro occidente de Colombia, limita con las cordilleras Central y Occidental. Cuenta con un área de 12,500.00 km² y está conformada por dos sistemas acuíferos que son:

- Sistema Acuífero Valle del Cauca
- Sistema Acuífero Patía

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 250 m con aproximadamente $10.1*10^{10}$ m³ de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Galeón, Popayán y Patía. En la Tabla 18, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 18. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Cauca-Patía

	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA CAUCA-PATÍA	Galeón Popayán Patía	Conglomerados estratificados, areniscas tobáceas y conglomerados polimícticos	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	Esmita Ferreira	Conglomerados y areniscas, lodolitas y carbón	Acuitardo
	Mosquera Guachinte	Conglomerados y areniscas cuarzosas Lutitas y Carbón	Acuitardo
	Morada Chimborazo	Conglomerados polimícticos y, arenitas Calizas, conglomerados polimícticos y lutitas	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	Río Guabas Agua Clara, Chapungo Nogales	Limolitas, conglomerados y areniscas	Acuitardo
			Acuífero porosidad secundaria
	Grupo Diabásico / Amaime	Basaltos chert y diabasas	Acuífuga

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA CORDILLERA ORIENTAL

La provincia Cordillera Oriental se ubica en el centro oriente de Colombia, limita con el piedemonte llanero y al oriente y norte con Venezuela. Cuenta con un área de 59,933.77 km² y está conformada por seis sistemas acuíferos que son:

- Sistema Acuífero San Gil - Barichara
- Sistema Acuífero Bucaramanga – Piedecuesta
- Sistema Acuífera Tunja
- Sistema Acuífera Duitama Sogamoso
- Sistema Acuífero Ubaté-Chiquinquirá
- Sistema Acuífero Sabana de Bogotá

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de, 3,400 m con aproximadamente $90.07*10^{10}$ m³ de reservas. Las formaciones de mayor interés son las formaciones Tilata, Guadalupe y Patía, Socha y depósitos aluviales. En la Tabla 19, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 19. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Cordillera oriental

	Formación		Litología Predominante	Clasificación hidrológica
CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA CORDILLERA ORIENTAL	Depósitos fluviolacustres. Tilata		Depósitos aluviales, glaciares y lacustre	Acuífero porosidad primaria
	Concentración		Lutitas	Acuitardo
	Bogotá		Lutitas y areniscas	Acuífero porosidad secundaria
				Acuitardo
	Picacho		Areniscas y conglomerados	Acuífero porosidad primaria
	Socha	Superior	Lutitas y areniscas	Acuitardo
		Inferior	Areniscas	Acuífero porosidad primaria
	Guaduas		Lutitas, areniscas y carbón	Acuitardo
				Acuífero porosidad primaria
	Guadalupe		Areniscas con intercalaciones de lutitas	Acuífero porosidad primaria
	GR. Villeta	Chipaque	Lutitas, calizas y areniscas	Acuitardo
		Une	Areniscas con intercalaciones de lutitas	Acuífero porosidad secundaria
		Fómeque	Lutitas oscuras	Acuitardo
	Areniscas las Juntas		Areniscas con intercalaciones de lutitas.	Acuífero porosidad secundaria
	Macanal		Lutitas	Acuífuga

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

PROVINCIA HIDROGEOLÓGICA CATATUMBO

La provincia Catatumbo, se ubica en el nororiente de Colombia, limita en el norte y el oriente con Venezuela. Tiene una extensión de 6,963.31 km² y está conformada por un sistema acuífero que es:

- Sistema Acuífero Cúcuta - Villa del Rosario

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua – ENA, se considera que el acuífero en esta provincia tiene un espesor de 1,150 m con aproximadamente $8.36*10^{10}$ m3 de reservas.

Las formaciones de mayor interés son las formaciones Carbonera, Mirador y Guayabo. En la Tabla 20, se encuentra la clasificación hidroestratigráfica de la provincia.

Tabla 20. Clasificación hidroestratigráfica de la provincia Catatumbo

	Formación	Litología Predominante	Clasificación hidrológica
CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA CATATUMBO	Guayabo	Arenas friables, limolitas, arcillolitas y arcillas.	Acuífero porosidad primaria
	León	Arcillolitas con niveles delgados de areniscas intercaladas con láminas carbonáceas	Acuífero porosidad primaria
			Acuitardo
	Carbonera	Areniscas intercaladas con arcillolitas y algunos mantos de carbón	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	Mirador	Areniscas en parte conglomeráticas, algo friables, bien fracturadas y de buena permeabilidad.	Acuífero porosidad primaria
	Los Cuervos	Arcillolitas carbonáceas intercaladas con areniscas de grano muy fino.	Acuitardo
	Barco Catatumbo	Areniscas con lutitas.	Acuitardo
			Acuífero porosidad primaria
	Mito – Juan	Lutitas la parte alta, hay delgadas capas de calizas.	Acuitardo
	Colón	Arcillas pizarrosas, un poco calcáreas. En la base hay una zona de areniscas	Acuitardo
	La Luna	Calizas intercaladas con lutitas	Acuífero porosidad secundaria
	Capacho	Calizas con intercalaciones de lutitas.	Acuífero porosidad secundaria
	Aguardiente	Areniscas intercaladas con láminas lutitas y caliza en la parte inferior	Acuífero porosidad primaria

	Mercedes	Calizas intercaladas con lutitas y areniscas	Acuífero porosidad secundaria
	Tibú	Areniscas basales de grano grueso, seguidas de una serie de calizas	Acuífero porosidad secundaria
	Río Negro	Cuarzo arenitas de grano grueso, areniscas conglomeráticas	Acuífero porosidad primaria
	Gp. Girón	Areniscas conglomeráticas y conglomerados, ocasionalmente calcárea	Acuífero porosidad secundaria
	Fm. La Quinta	Sublitarenistas de grano fino a medio ocasionalmente conglomeráticas con intraclastos de limolitas	Acuífero porosidad secundaria
			Acuífuga

Fuente: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia

2.4. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Luego de haber definido la zona de interés, su caracterización geológica, la provincia hidrogeológica en la que se encuentra y las formaciones de interés de acuerdo a la capacidad de almacenamiento de agua, se debe realizar un estudio geoeléctrico con el fin de corroborar las condiciones presentes en el subsuelo, es decir, las litologías, sus espesores, sus profundidades y la presencia de agua subterránea.

2.4.1. ESTUDIO GEOLÉCTRICO

Las prospecciones geofísicas son métodos de exploración utilizados para el reconocimiento y descripción de los componentes del subsuelo en dos o tres dimensiones, por medio de un análisis del comportamiento de las rocas, y de sus propiedades físicas. En este caso, en particular, se especifican las condiciones para la búsqueda de agua subterránea, aunque estos métodos tienen múltiples aplicaciones como la prospección de hidrocarburos, de minerales metálicos y no metálicos, detección de fallas, detección de tuberías, búsqueda de restos arqueológicos entre otros[9].

Existen diversos métodos geoelétricos que realizan un análisis de las propiedades físicas de las rocas de diferentes maneras, entre los más conocidos se encuentran:

- **Los sondeos eléctricos verticales (SEV):** en este método se realiza inyección de corriente eléctrica, consiste en la inyección de corriente continua en la superficie, con el fin de obtener un perfil indicando las resistividades de los materiales que se encuentran en el subsuelo.

[9] AUGE, Miguel. Métodos geoeléctricos para la prospección de agua subterránea. 2008. Pág.1

- **Las tomografías eléctricas resistivas (TER):** este es uno de los métodos más utilizados para la búsqueda de agua subterránea, que proporcionan perfiles de resistividad del subsuelo y proporcionan información lateral del medio[10].

- **La polarización inducida (IP):** es un método que no se utiliza comúnmente, y en el que se inyecta corriente a la superficie del terreno para poder observar su capacidad de retener la carga eléctrica[11].

- **El potencial espontaneo (SP):** este método realiza la medición del potencial eléctrico natural de un terreno[12].

- **El método electromagnético (EM):** mide la respuesta a la radiación electromagnética del suelo[13].

Es importante aclarar que, aunque la prospección geofísica es la herramienta más idónea para la búsqueda e identificación de los recursos en el subsuelo, no es totalmente acertada debido a que, por medio de estas mediciones, se obtienen interpretaciones de las posibles litologías y de la distribución de los recursos.

Se considera que en la actualidad los sondeos eléctricos verticales y las tomografías son los métodos más usados para la determinación de la litología del subsuelo, su espesor, su profundidad y, por lo tanto, la búsqueda de aguas subterráneas.

2.4.2. RESISTIVIDAD

Es la resistencia que presenta el subsuelo al paso de una corriente eléctrica. Esta propiedad física está expresada en ohm-metro (Ω/m) y es inversamente proporcional a la conductividad[14]. Los SEV y las tomografías eléctricas, son métodos por medio de los que se permite conocer la resistividad del terreno y así establecer las características de las litologías presentes.

La resistividad de un material depende de su longitud y su área y está definida por la ecuación:

$$R = p\frac{l}{a}$$

[10] MONTAÑO, Félix. VEGA, Pedro. Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica. 2007. Pág. 66
[11] AUGE, Miguel. Métodos geoeléctricos para la prospección de agua subterránea. 2008. Pág.2
[12] Ibid. Pág. 2
[13] Ibid. Pág. 2

Donde,

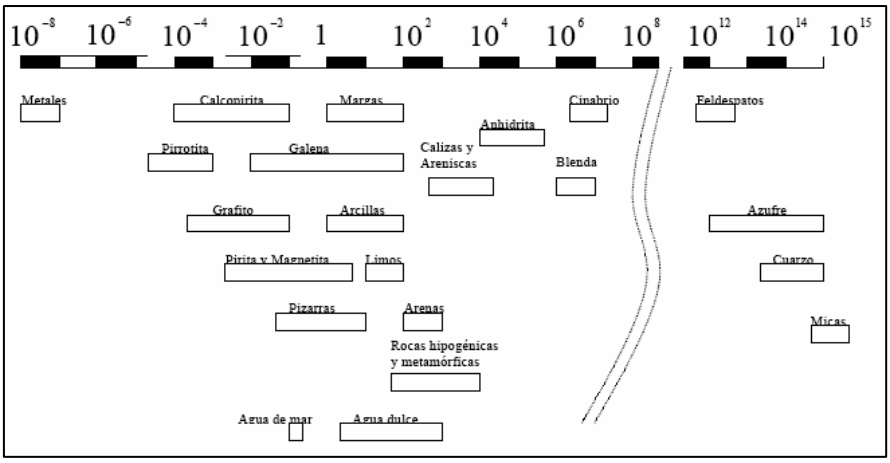
R:la resistividad
p: constante de proporcionalidad
l: longitud
a: área

2.4.3 RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS Y ZONAS SATURADAS

La resistividad de las rocas es variable, ya que depende de diversos factores como la porosidad, la permeabilidad, la presencia de líquidos y gases. Sin embargo, en términos generales se considera que la resistividad de las rocas es alta, y son consideradas como conductores de baja capacidad[15].

En la Ilustración 21, se puede observar los rangos de resistividad que caracterizan algunos materiales de interés geológico.

Ilustración 21. Resistividad de las rocas



Fuente: Prospección geoeléctrica en corriente continua. Ernesto Orellana Silva. 1982

Algunos factores que pueden afectar la resistividad de las rocas son la saturación, la temperatura, la salinidad y la presencia arcillas con capacidad de intercambio catiónico.

El agua que se encuentra presente en los acuíferos de materiales arenosos y depósitos cuaternarios, presenta una resistividad notablemente menor al material no saturado. Por otra parte, si los poros de las rocas se encuentran en contacto, es decir, cuando hay porosidad efectiva alta, las rocas se comportan como conductores iónicos[16].

[15] ARLANDI, Manuel, Geofísica aplicada a la obra civil, método geoeléctrico y sísmica de refracción, casos prácticos. Pág. 16
[16] ARLANDI, Manuel, Geofísica aplicada a la obra civil, método geoeléctrico y sísmica de refracción, casos

En los acuíferos costeros, es posible diferenciar los acuíferos que presentan salinidad, que es altamente resistiva con los de agua dulce. Uno de los factores que puede afectar la resistividad de las zonas saturadas es la contaminación generada por sustancias orgánicas[17].

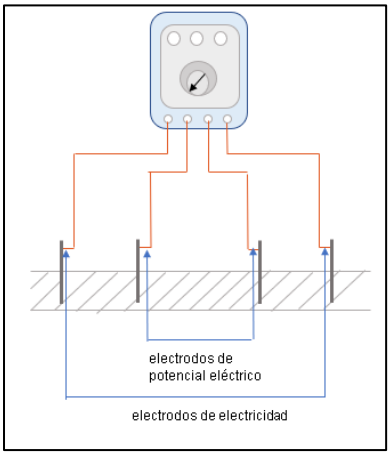
2.4.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Es un método que realiza varias medidas de resistencia eléctrica, mediante la inyección de corriente a través de electrodos enterrados a distintos puntos del terreno a lo largo de una línea recta. Con el fin de realizar una adecuada prospección del terreno, y de su posterior interpretación del subsuelo, se debe identificar la geología regional de la zona y definir el área idónea para realizar las mediciones.

2.4.2.1.1. Equipo utilizado:

El equipo utilizado en los sondeos eléctricos verticales para la inyección de corriente y, por lo tanto, la medición de la resistencia del terreno se denomina terrometro. Este equipo cuenta con cuatro conectores para electrodos que deben ser enterrados en el suelo, dos de ellos se ubican en los extremos y son los encargados de inyectar la corriente y los dos electrodos internos se encargan de la medida de potencial eléctrico. En la Ilustración 22, se puede observar el esquema de un terrometro y en la ilustración 23, se observa un terrometro.

Ilustración 22. Esquema del terrometro



Fuente: Elaboración propia

prácticos. Pág. 18.
[17] Ibid. Pág. 19

Ilustración 23. Terrometro

Fuente: Telmex

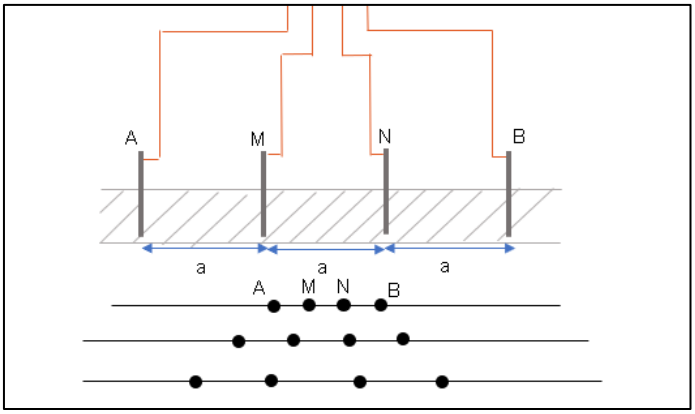
2.4.2.1.2. Pasos para realizar la medición de la resistencia con el terrometro

Con el fin de realizar una adecuada medición y obtención de las resistividades del terreno, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Selección del arreglo de los electrodos: existen dos métodos para obtener las resistencias de los materiales que componen el subsuelo de un terreno de acuerdo al arreglo de los electrodos y por medio de los cuales se puede determinar la resistividad aparente (diferente a la resistividad de los estratos).

El primer método es el de Wenner, desarrollado por el Dr. Frank Wenner. En este método los cuatro electrodos se ubican en una línea recta a distancias equidistantes[18], es decir, que la distancia de separación entre cada uno de los electrodos es la misma, como se puede observar en la Ilustración 24.

Ilustración 24. Arreglo Wenner



Fuente: Elaboración propia

[18] RIQUELME, Esteban, Resistivad del terreno, estudio geoeléctrico. Pág 2.

Con el terrometro, se realiza la medición de la resistencia del terreno, y una vez se tiene este valor se realiza el cálculo de la resistividad aparente con la siguiente ecuación:

$$p = 2.\pi.R.a$$

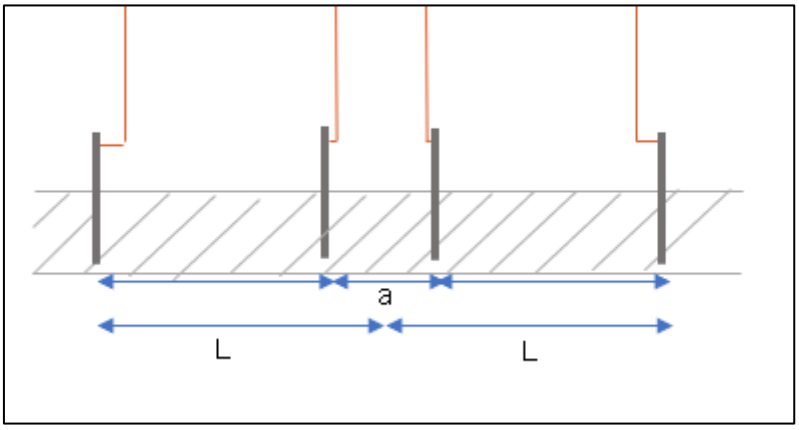
Donde:

a: es la distancia entre los electrodos
R: la resistencia medida por el terrometro

La desventaja de este método es que los electrodos utilizan más espacio cuando las medidas van aumentando debido a que los electrodos se encuentran a la misma distancia.

El segundo método es el de Schlumberger, desarrollado por Conrad y Marcel Schlumberger. En este método los electrodos potenciales se mantienen fijos y los electrodos de corriente se van moviendo a medida que se van realizando las mediciones del terreno[19]. Por lo tanto, la separación entre un electrodo de corriente y uno de potencial es mayor que la separación entre los dos electrodos de potencial, como se observa en la ilustración 25.

Ilustración 25. Arreglo Schlumberger



Fuente: Autores

Una vez el terrometro haya realizado la medición de la resistencia del terreno, se puede calcular el valor n, con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{2.L - a}{2.a}$$

[19] Ibid. Pág. 4

Donde,

L: es la distancia entre un electrodo de corriente y el centro de la medición
A: es la separación entre los electrodos de potencia

Una vez tenemos este valor, se debe calcular, la resistividad aparente con la siguiente ecuación:

$$p = \pi . R . a . n . (n + 1)$$

1. Una vez se ha seleccionado el arreglo que se va a usar y se ha realizado la primera medición, se mueven los electrodos, se registra la resistencia y se calcula la resistividad aparente nuevamente

2. Se repite el punto anterior varias veces hasta cubrir todo el terreno

3. En el caso de seleccionar el arreglo de Wenner se anotan la información, como se observa en la Tabla 21.

Tabla 21. Información requerida arreglo Wenner

Sentido de la medición	N° de medición	Separación a (m)	Resistencia (ohm Ω)	Resistividad aparente (ohm-metro Ω/m).
	1			
	2			
	3			
	4			

Fuente**:** Resistividad del terreno, estudio geoeléctrico

4. En el caso de seleccionar el arreglo de Schlumberger se anota la información observada en la Tabla 22.

Tabla 22. Información requerida arreglo Schlumberger

N° de medición	Separación L (m)	Separación a (m)	Resistencia (ohm Ω)	n	n+1	Resistividad aparente (ohm-metro Ω/m).
1						
2						

Fuente: Resistividad del terreno, estudio geoeléctrico

5. Determinar las resistividades de los estratos y los espesores de cada uno de ellos, esto se puede realizar de dos maneras:

- Método manual: para esto se debe realizar la curva de resistividad aparente, que consiste en graficar logarítmicamente, el valor de resistividad aparente vs la separación de los electrodos, con este perfil se puede determinar el

número de capas que es igual a la cantidad de cambios del sentido de la curva.

La curva de resistividad aparente se compara con unas curvas base generadas por Compagnie Générale de Géophysique en 1955, sin embargo, este método es tiene una limitación y es que solo sirve cuando el número de capas es menor a 4.

- Análisis con software: El software más utilizado para determinar las resistividades de los estratos y sus espesores es IPI2WIN. Este programa compara los datos obtenidos en el sondeo eléctrico vertical y la resistividad aparente con las curvas patrón, generando el número de estratos, sus espesores y sus resistividades.

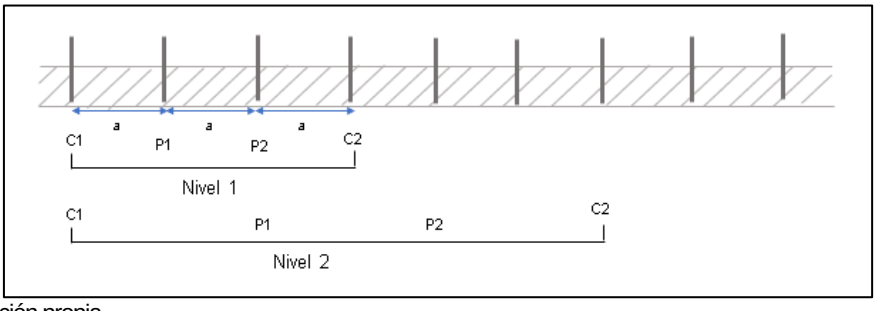
6. Con base en los resultados obtenidos de resistividades, espesores, se realiza una correlación con la geología de la zona y con las resistividades teóricas para las rocas y se genera un modelo geológico-geofísico señalando las litologías y los distintos recursos encontrados,

2.4.5 TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

La tomografía eléctrica es un método de prospección geofísica que utiliza el mismo principio de los sondeos eléctricos verticales, pero a diferencia de estos, utiliza numerosos electrodos y su ventaja es que no se debe realizar el desplazamiento de los electrodos en el momento de las mediciones. Este método es de gran utilidad para obtener información lateral del medio[20].

Este método realiza la medición nivel por nivel, como se evidencia en la Ilustración 26, hasta completar la medición de todos los electrodos.

Ilustración 26. Ubicación de electrodos en las tomografías

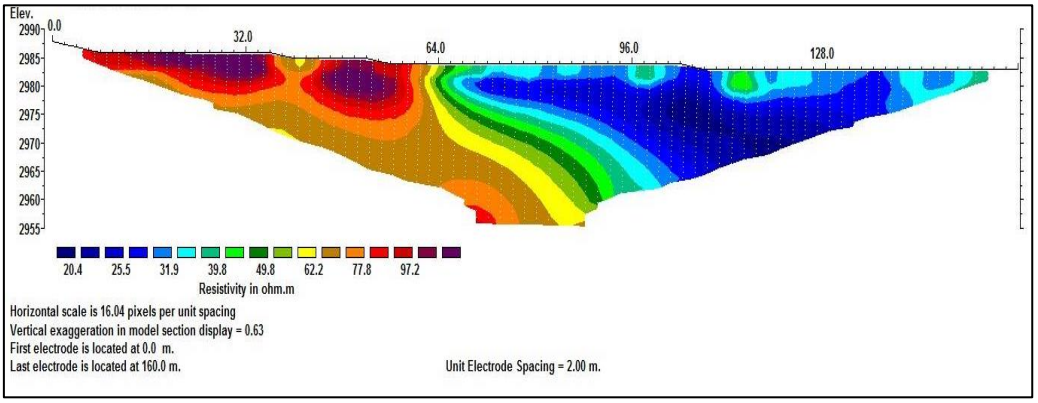


Fuente: Elaboración propia

[20] MONTAÑO, Félix. VEGA, Pedro. Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica. 2007. Pág. 66

Después de realizar las mediciones, se obtienen las resistividades aparentes del terreno, con este valor y por medio del software EarthImager 2D, se obtiene el número de estratos, sus espesores, su resistividad y un perfil como se observa en la Ilustración 27.

Ilustración 27. Perfil generado luego de una tomografía

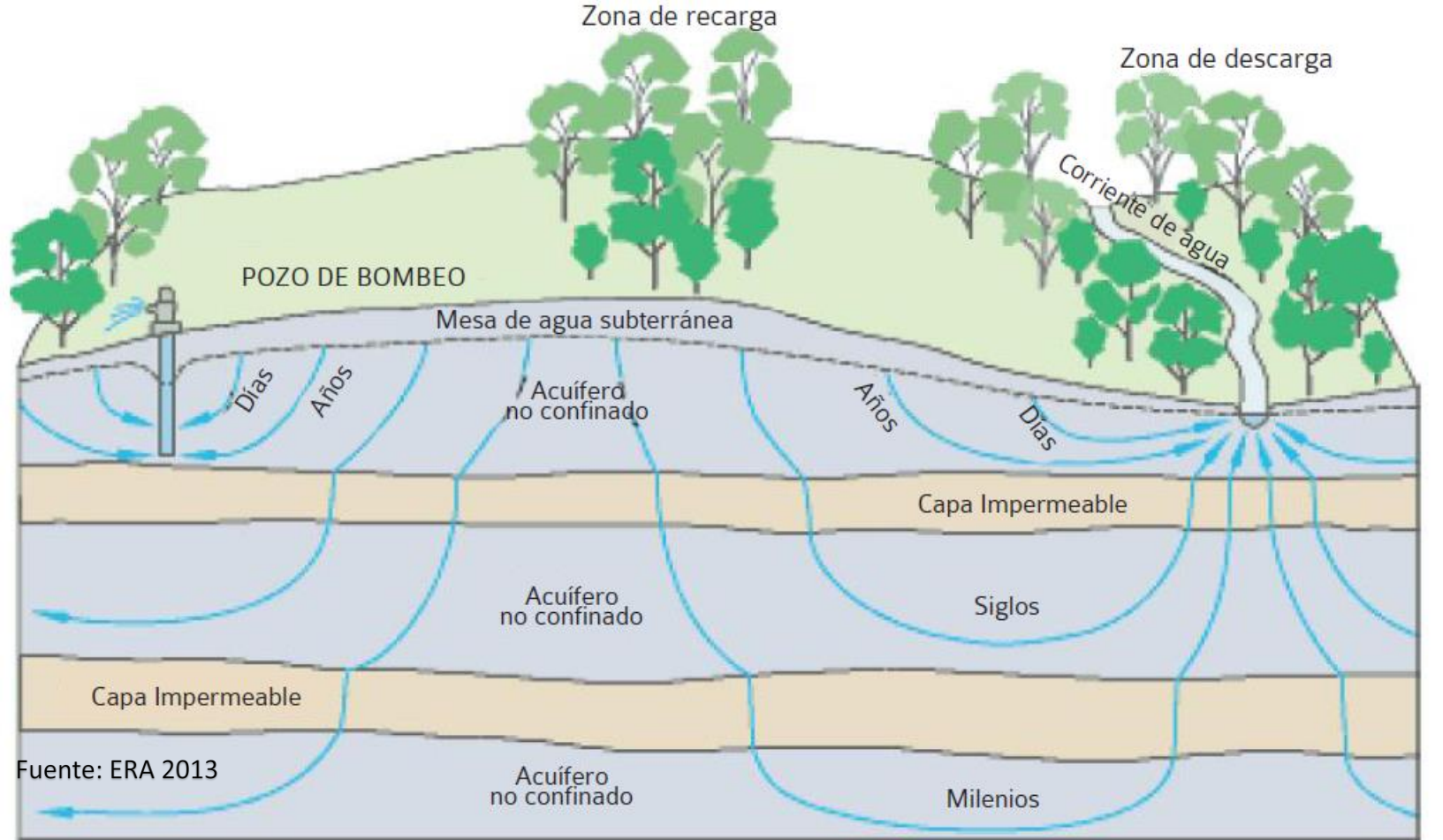


Fuente: Alternativas de abastecimiento de agua en la microcuenca del Río Pomeca en Motavita, Boyacá, Colombia

Con este perfil y con una correlación de la geología de la zona, se realiza un perfil geológico identificando los componentes del subsuelo.

CAPÍTULO 3.

Modelo Hidrológico



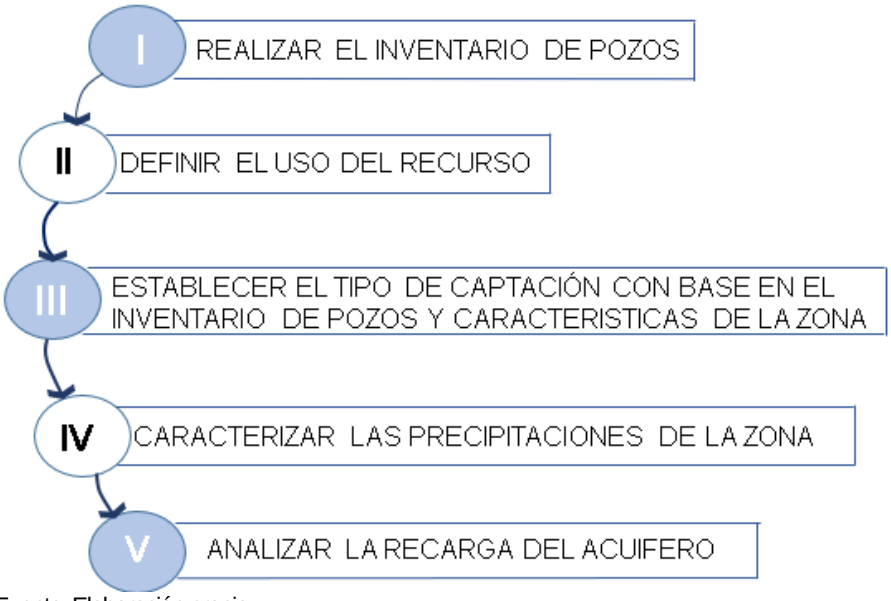
Fuente: ERA 2013

3. MODELO HIDROLÓGICO

En el componente hidrológico está compuesto por cinco (5) etapas que se observan en la Ilustración 28, inicialmente se debe abarcar el conocimiento de las diferentes captaciones que se encuentran presentes en la zona en la cual se desea realizar la extracción de agua, para ello se hace necesario la elaboración de un inventario de los pozos, aljibes, nacederos que se encuentre en la ubicación de estudio. Una vez se identifique estas estructuras se debe realizar una inspección de ellas en el cual se determinen datos de niveles, los usos que se les están dando a esas formaciones y la calidad de agua presente en ellas.

Así mismo, para el análisis hidrológico es necesario conocer los registros hidroclimatológicos históricos de las diferentes variables que intervienen en la recarga de las formaciones hidrogeológicas, como son la temperatura, humedad, evapotranspiración, precipitación y caudal.

Ilustración 28. Etapas que definen el modelo hidrológico



Fuente: Elaboración propia

3.1. INVENTARIO DE PUNTOS HIDROGEOLÓGICOS

Como punto de partida para el modelo hidrológico se deben identificar todos los puntos de la zona que contengan aguas subterráneas y se encuentren en uso o se conozca que existió un aprovechamiento del recurso. Un punto de agua subterránea corresponde a un lugar u obra civil a través del cual se puede tener acceso al agua subterránea, incluyendo pozos, aljibes, surgencias naturales o manantiales que corresponden a zonas de descargas del acuífero; y lagos o lagunas cuando son

salidas o afloramientos de acuíferos someros.[21]

El inventario de puntos de agua subterránea es una actividad muy importante, ya que por medio de este se puede realizar un análisis de los datos recolectados en el que se puede plantear de manera preliminar aspectos sobre el funcionamiento del sistema acuífero. Para esta actividad se debe iniciar con la investigación y análisis de información secundaria acerca de captaciones de agua subterránea, disponible en los institutos de investigación del nivel nacional o regional, así como las entidades territoriales, las instituciones académicas, o en la información que se encuentra en los expedientes de trámites de concesión otorgados por las diferentes autoridades ambientales. [22]

Una vez identificados los puntos de agua subterránea, deben localizarse en un mapa base a escala apropiada, lo cual se podrá hacer de forma manual o utilizando programas que permitan generar la visualización de la información espacial, o lo que es más recomendable es hacer uso de los sistemas de información geográfica, que permiten concebir de forma más eficientemente los recorridos para levantar la información complementaria en campo.

Si se requiere una concesión de agua debido al uso que se le va a dar al agua subterránea, es necesario utilizar el Formulario Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua Subterránea - FUNIAS, diseñado por INGEOMINAS, IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, junto con los aportes de las Autoridades Ambientales competentes, el cual servirá a su vez de insumo para realizar el registro de usuarios del recurso hídrico (RURH), del que trata el Decreto 303 de 2012. [23]

Finalizando el inventario se debe realizar un análisis de la cantidad de puntos de agua subterránea en la zona, se evidencia que cerca del área de estudio se encuentran varias estructuras de captación de agua subterránea, esto corresponde a un buen escenario que indica que posiblemente en el lugar donde se quiere realizar la extracción de aguas subterráneas lo más factible es que si encuentre un acuífero. Pero si, por el contrario, en la zona de estudio no se encuentran pozos o existen muy pocos, esto puede ser un indicador que en el punto donde se desea realizar el aprovechamiento de agua puede no ser el más adecuado o deberá ser evaluado con los demás componentes tanto del modelo hidrogeológico, hidrológico e hidráulico.

[21] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá. Min Ambiente, 2014; pág 33.
[22] Ibíd., p.34
[23] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá. Min Ambiente, 2014; pág.33

3.1.1. NIVELES PIEZOMÉTRICOS

Los niveles de los puntos de agua subterránea son muy importantes en el proceso de evaluación del aprovechamiento de los acuíferos, ya que a través de estos se puede estimar la profundidad en que se encuentra el recurso hídrico, así como la dirección de flujo, con lo cual podemos establecer el comportamiento del sistema hidrogeológico.

Este valor de nivel nos puede indicar un dato muy importante, ya que dependiendo el nivel de profundidad del punto de aguas subterráneas se puede definir el tipo de captación a implementar en el aprovechamiento de aguas subterráneas, así como los costos del mismo, porque dependiendo si la demanda del recurso es bajo para uso personal de una familia y el nivel del agua es muy profundo los costos construcción de la captación de extracción del agua subterránea son muy elevados y se convertiría en un proyecto inviable.

Los niveles de agua en gran parte de los acuíferos se comportan de acuerdo con un patrón cíclico natural de fluctuación estacional, en el cual normalmente se puede apreciar un aumento en épocas de lluvias, debido a que se presenta una recarga del acuífero por el aumento de precipitaciones, en caso contrario en épocas de estiaje se puede observar un declive producto de la disminución de las precipitaciones y el aumentó de evapotranspiración que se presenta en épocas de verano.[24]

Otra forma de obtener información de los niveles es a través de las diferentes corporaciones y entidades ambientales y climatológicas, a nivel nacional se pueden obtener datos de registros del IDEAM, estás entidades realizan monitoreos de los pozos presentes en las diferentes provincias hidrogeológicas convirtiéndose en una fuente de información de niveles de los diferentes acuíferos que se encuentran en el territorio nacional, a nivel Colombia puede ser consultada en la página del IDEAM en el directorio del sistema de información del recurso hídrico SIRH.

3.1.2. USOS

Como parte de los datos obtenidos en el inventario de pozos, es de carácter relevante conocer el uso que se le está dando a estos puntos de aguas subterráneas, ya que si el recurso hídrico presenta algún tipo de alteración que no permita que sea apta para el consumo humano puede dejar de ser favorable para el aprovechamiento del agua, estas alteraciones pueden ser producto por ejemplo de niveles altos de sal o bajos o excesos valores de pH en el agua.

[24] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en Colombia, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá. Min Ambiente, 2015; p.39

De acuerdo con los datos presentados por las diferentes corporaciones en el Estudio Nacional del Agua 2010 se realizó una identificación de los usos de agua subterránea en el país, con los valores definidos en el ENA 2010 se pueden apreciar las diferentes aplicaciones que presentan las aguas subterráneas en el país, a continuación, en la Tabla 23, se presenta un resumen de los diferentes usos de agua subterránea.

Tabla 23. Distribución del uso de aguas subterráneas por provincia hidrogeológica.

AUTORIDAD AMBIENTAL	Doméstico	Industrial	Agrícola	Pecuario	Servicios	Otros	Total	Distribución Uso por
	m³/año	m³/año	m³/año	m³/año	m³/año	m³/año	m³/año	Autoridad Ambiental %
CORNARE	4.280.221	2.388.467	1.570.074	204.002	48.833	3.869	8.495.467	0.79
CORALINA	1.257.425	0	4.316	3.267.749	0	4.529.491	0.42	0.42
CDA	15	3	0	0	0	0	18	0
CORPOAMAZONIA	899.608	621.266	91.52	207.52	78.577	1.898.491	0.18	0.18
CVS	0	862.825	0	707.352	667.302	2.237.479	0.21	0.21
CORPONOR	2.913.687	502.97	25.600.385	44.68	221.92	566.475	29.850.117	2.78
CARDIQUE	4.939.175	774.84	720.014	996.538	0	546.519	7.977.085	0.74
CRC	4.280.221	2.388.467	1.570.074	204.002	48.833	3.869	8.495.467	0.79
CVC	8.598.999	19.600.384	383.850.779	0	0	0	412.050.162	38.41
CARDER	4.316.017	13.251.427	7.884	93.536	154.842	0	17.823.706	1.66
DAGMA	92.843	4.401.281	276.175	0	2.517.753	0	7.288.052	0.68
CORPOCESAR	65	1.443	2.577	0	3.9	0	7.985	0
AMVA	83	122	0	0	181	0	386	0
DAMAB	14.4	2.530.151	0	0	972.749	0	3.517.301	0.33
CRQ	371.494	867.24	50.458	0	0	27.752	1.316.943	0.12
CORPOGUAJIRA	6.271.096	422.701	3.021.281	2.360.807	0	9.585.608	21.661.488	2.02
CAR	45.713.952	0	164.255.826	27.731.008	2.348.724	19.765.381	259.814.891	24.22
CORTOLIMA	5.106.057	1.589.541	54.434.290	576.194	252.288	79.881	62.038.251	5.78
CARSUCRE	Sin Información	Sin Información	Sin Información	Sin Información	Sin Información	Sin Información	0	3.91

AUTORIDAD AMBIENTAL	Doméstico	Industrial	Agrícola	Pecuario	Servicios	Otros	Total	Distribución Uso por
	m³/año	m³/año	m³/año	m³/año	m³/año	m³/año	m³/año	Autoridad Ambiental %
CORPOURABÁ	388.457	5.568.753	15.566.710	3.12	0	0	21.527.040	2.01
CORPOMAG	3.780.000	4.260.000	63.860.000	0	0	94	71.994.000	6.71
CRA	Sin Información	Sin Información	Sin Información	Sin Información	Sin Información	Sin Información	6.035.745	0.56
CRC	0	596.556	429.169	0	0	14.215.318	15.241.043	1.42
CARSUCRE	23.055.002	72.808	105.408	732.569	49.433	24.015.220	2.24	2.24
SDA	52.012	4.506.084	140.662	62.298	120.926	1.043.338	5.925.320	0.55
CORPONARIÑO	505.958	35.417	47.433	342.152	930.96	0.09		0.09
CVS	80.743	271.334	408.592	109.016	2.179.302	3.048.987	0.28	0.28
CORPOBOYACÁ	5.625.088	282.636	565.698	6.473.422	0.6			0.6
CORANTIOQUIA	1.555.200	78.071	124.416	373.248	2.130.935	0.2		0.2
CORMACARENA	22.673.295	1.425.686	-	0	0	205.286	24.304.267	2.27
CORPOCHIVOR	181.26	0	8.515	11.116	7.569	0	208.46	0.02
CORPORINOQUIA	15.768	0	0	0	5.676	0	21.444	0
TOTAL	146.968.141	67.300.473	716.620.736	34.301.006	10.846.765	48.786.760	1.072.859.620	100

Fuente: IDEAM[25]

De la tabla anterior se puede observar que en Colombia el sector agrícola es el que presenta un mayor uso de agua subterránea, alcanzando un 75% del agua subterránea reportada por las diferentes corporaciones regionales, seguida por el uso doméstico que llega a un 9%, el uso industrial que presenta un 7%, un uso pecuario de un 4%, servicios un 2% y finalmente otros usos con un 4%.[26]

[25] IDEAM. Aguas Subterráneas en Colombia: una Visión General. Bogotá D. C., 2013; p.79

[26] Ibid Pág. 79

3.1.3. CALIDAD

Otro componente fundamental en el inventario de puntos de agua subterránea corresponde a la calidad del agua que se encuentra presente en las diferentes captaciones existentes e inspeccionadas, este dato brinda un valor muy importante, ya que con él se puede conocer si dentro de los pozos o aljibes de la zona se encuentra agua contaminada; de encontrar agua con baja calidad por algún tipo de contaminación esto disminuye la posibilidad de una extracción de agua subterránea, toda vez que esto implicaría realizar un tratamiento lo que generaría unos costos iniciales para la construcción del sistema de tratamiento y adicionalmente unos costos de operación lo que puede representar un proyecto inviable desde el componente económico.

3.1.4. TIPO DE CAPTACIÓN

Otro componente que hace parte del inventario de agua subterránea corresponde a la revisión del tipo de captación del punto de agua explorado, con el cual se puede identificar de forma general el porcentaje de los diferentes tipos de captación presentes en el área de estudio y de esta manera establecer de manera preliminar las posibles captaciones que pueda requerir en el lugar definido para el aprovechamiento de agua subterránea. A continuación, se describen los tipos de captación de agua subterránea.

3.1.4.1.1. Pozos

Se conoce como pozo o perforación a la excavación que se realiza en la tierra para extraer agua. Comúnmente los pozos son de grandes profundidades y diámetros pequeños[27], en la llustración 29, se puede observar un ejemplo de un pozo profundo.

[27] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en Colombia, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá. Min Ambiente, 2015; p.39

Ilustración 29. Pozo Profundo

Fuente: Guajira Colombia

3.1.4.1.2. Aljibes

Los aljibes son excavaciones manuales de gran diámetro, como se evidencia en la Ilustración 30; estos buscan llegar al nivel freático para a partir de ese punto profundiza la excavación por debajo de la tabla de agua y de esta forma acumular agua subterránea que está disponible para ser bombeada. [28]

Ilustración 30. Aljibe

Fuente: Guajira Colombia

[28] Ibid

3.1.4.1.3. Nacederos (Manantial)

Los nacederos se denominan como una “Surgencia superficial de agua de origen subterráneo que se produce a través de planos de estratificación, discontinuidades de las rocas como fracturas, grietas o cambios de litología en lugares donde la superficie topográfica corta al nivel freático” [29]. En la Ilustración 31 se observa un ejemplo de un nacedero.

Ilustración 31. Nacedero

Fuente: Meta Colombia

Este tipo de captaciones es la más fácil de identificar en campo debido a que el agua se puede observar en la superficie en un punto donde el terreno se encuentra por debajo de la tabla de agua (Nivel freático).

3.1.4.1.4. Piezómetros

Otro tipo de captación corresponde a los piezómetros, que básicamente son un "pozo completamente entubado, excepto en su base, utilizado para medir la carga

[29] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en Colombia, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá. Min Ambiente, 2015; p.39

hidráulica en ese punto.” [30] En la Ilustración 32, se presenta un ejemplo de un piezómetro.

Ilustración 32. Piezómetro

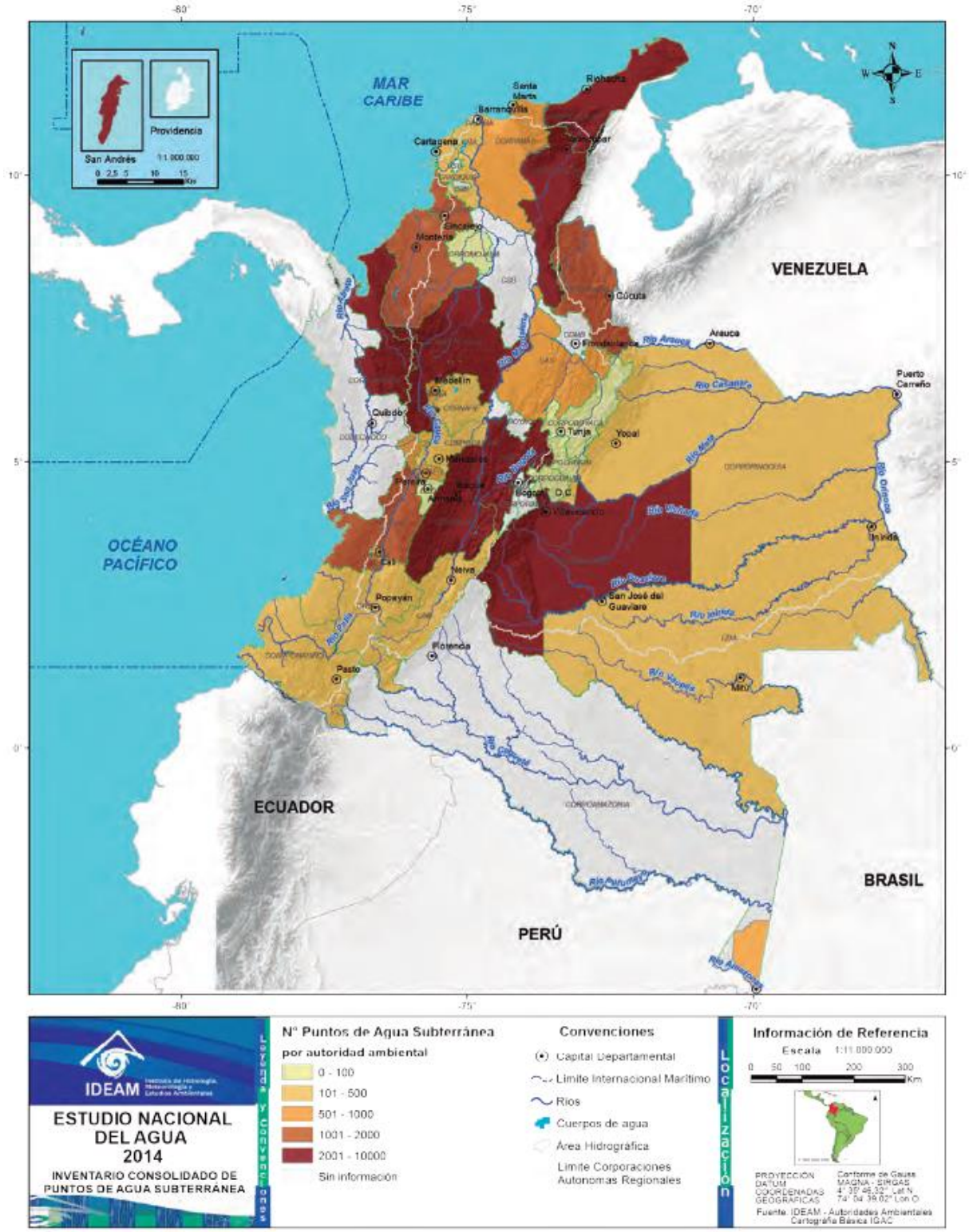
Fuente: IDEAM

Este tipo de captaciones son utilizadas por las diferentes entidades como corporaciones regionales y entidades de orden nacional de seguimiento ambiental e hídrico para realizar el monitoreo de los niveles de los diferentes acuíferos.

Finalmente, como parte del inventario de puntos de agua subterránea, en la Ilustración 33 se puede identificar cuantos puntos existen por captación a lo largo del territorio nacional, con el cual se puede establecer por departamento la importancia del recurso hídrico. Con el mapa de inventarios consolidado de puntos de agua subterránea se puede conocer a nivel regional cuantos puntos se encuentran cerca del área de estudio.

[30] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en Colombia, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá. Min Ambiente, 2015; p.39

Ilustración 33. Mapa de Inventario Consolidado de Puntos de Agua Subterránea



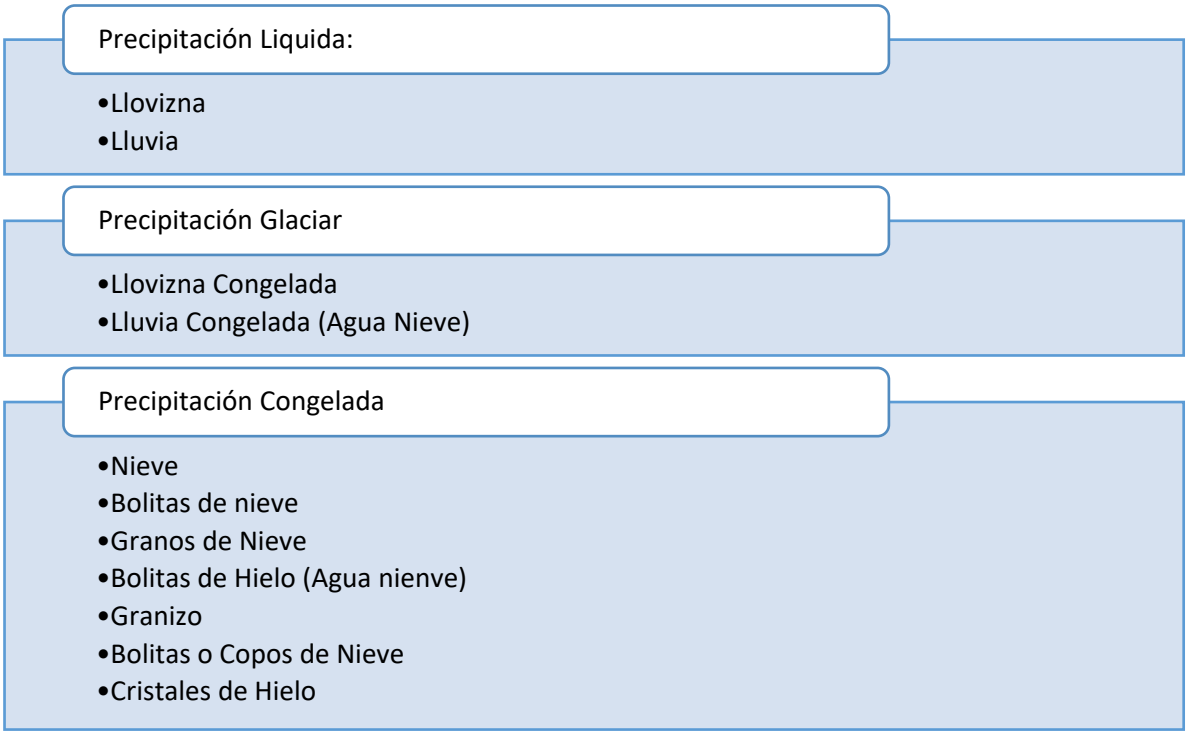
Fuente IDEAM

3.2. ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES Y RECARGA

En el componente de precipitaciones y recargas se describe de forma general la importancia de la precipitación y los tipos de flujo que se presentan en el suelo, que describen el comportamiento que admite el ingreso de agua al acuífero y permiten la recarga de la unidad hidrogeológica.

3.2.1. PRECIPITACIÓN

La precipitación corresponde al producto de la condensación del agua que se encuentra en la atmosfera que se deposita en la superficie terrestre, esto sucede cuando la atmosfera que es un compuesto gaseoso es saturada por el vapor de agua, la cual se condensa y cae, es decir se precipita. Este componente es el principal factor del ciclo hidrológico y es responsable en situar la mayor parte de agua dulce en el mundo. La precipitación que alcanza la superficie terrestre puede producirse de diferentes formas y se puede clasificar en las siguientes categorías:[31]

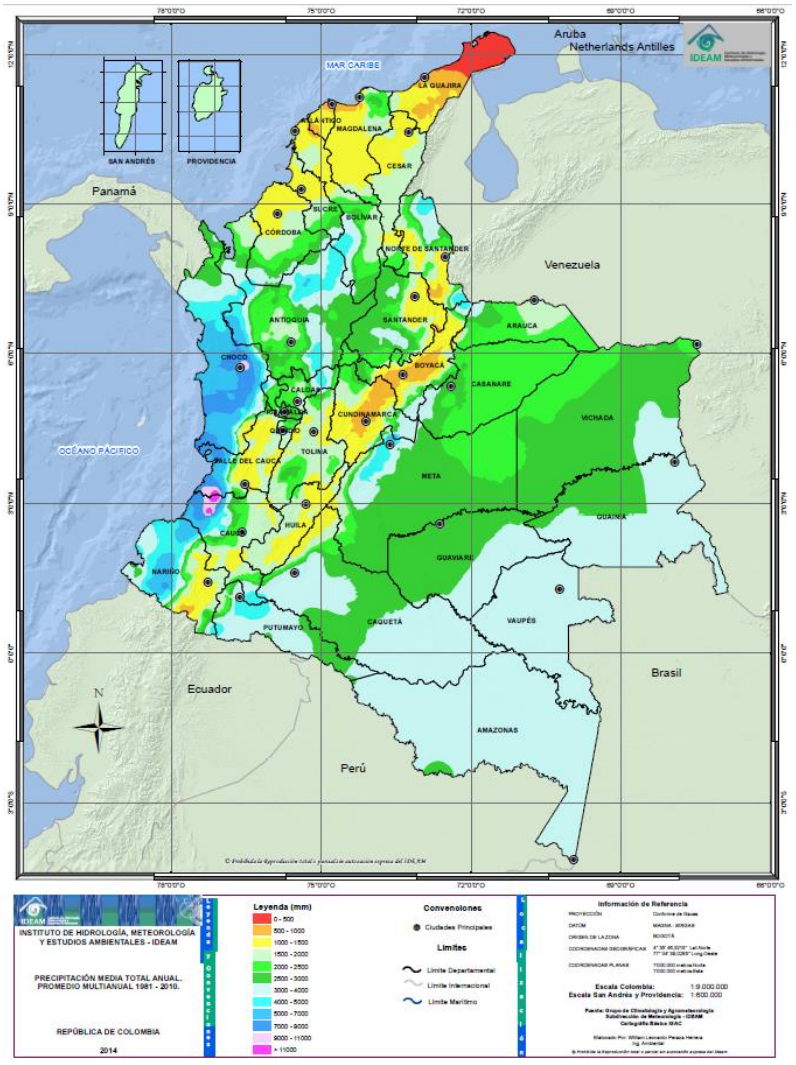


[31] CICLOHIDROLOGICO, «Pérez, G. Precipitación [PRECIPITACIÓN Y TIPOS DE PRECIPITACIÓN] Ejemplo,» [En línea]. Disponible: https://www.ciclohidrologico.com/precipitacin.

En la
Ilustración 34 se presenta un mapa de las precipitaciones totales anuales promedios mensuales entre el periodo de 1981 al 2010 en el que se puede identificar las zonas con mayor cantidad de precipitación en un año, esta información ofrece un valor muy relevante toda vez que, si la zona del área de estudio presenta una cantidad alta de precipitación, muy posiblemente es una zona con una buena recarga del acuífero.

Otro factor que indica los datos de precipitación es, que en las zonas que se presenta mayor precipitación el agua se encuentra más somera, es decir, a menor profundidad, respeto a las zonas de menores lluvias en la cual el agua subterránea se encuentra con altas profundidades lo que implica costos mayores en el proceso de extracción.

Ilustración 34. Mapa de Precipitación Media Total Anual Promedio Multianual 1981-2010



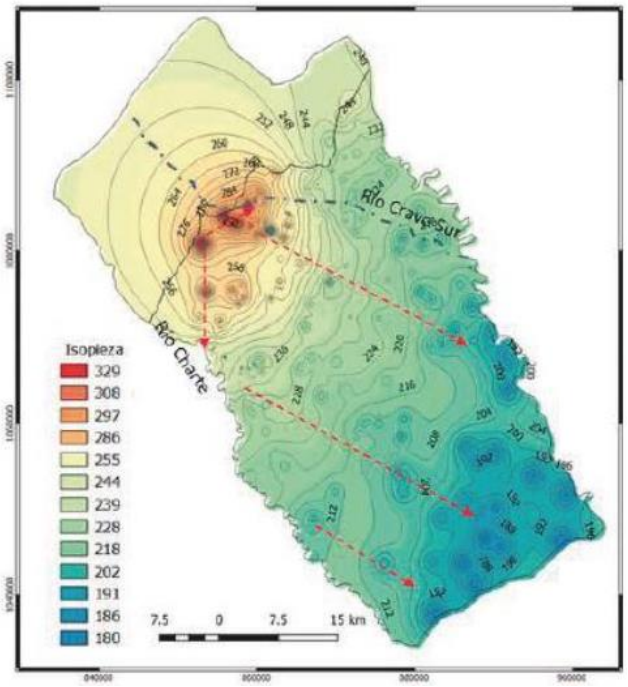
Fuente: IDEAM

3.2.2. TIPOS DE FLUJO

Los sistemas de flujos para aguas subterráneas hacen parte del ciclo hidrológico y son un componente muy importante en la recarga del acuífero, ya que los tipos de flujo indican el movimiento del agua a través del suelo. Estos movimientos pueden ser presentados de forma horizontal y vertical.

Para determinar el movimiento de suelo es necesario establecer el medio que conforma el suelo, si es poroso o si son rocas fracturadas. Para que el agua realice un movimiento en un acuífero se debe presentar una diferencia de presión de altura. Si se desea medir la diferencia de presión en un laboratorio se emplea algún tipo de manómetro. En campo se puede realizar esta medida identificando la diferencia de altura entre dos piezómetros. “Con los datos obtenidos se establecen los mapas piezométricos que indican las zonas del acuífero con mayor o menor altura de presión (nivel referido a cota absoluta). Basándose en mapas piezométricos, como se evidencia en la Ilustración 35, se puede determinar la dirección del movimiento del agua subterránea y su pendiente”[32]

Ilustración 35. Mapa Piezométrico



Fuente: Universidad Industrial de Santander[33]

[32] IDEAM, Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. 2013. Bogotá, D. C. 276 págs.

[33] Gómez-Niño, H.I. (2020). Análisis de niveles piezométricos y patrones de captación de agua subterránea en el acuífero cuaternario de Yopal, Casanare, Colombia. Boletín de Geología, 42(2), 89-103.

En laIlustración 36 se puede observar un ejemplo del comportamiento del flujo del agua representada por líneas equipotenciales o isopiezas que fueron categorizadas por colores, donde las de color rojo representan una mayor carga hidráulica y en color azul una menor carga. Finalmente, las flechas indican el sentido del flujo de agua subterránea.

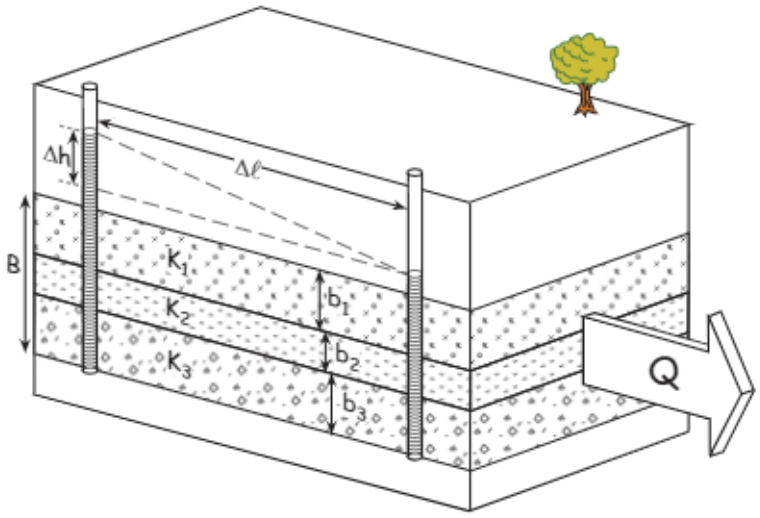
La distribución vertical que se presenta en el agua subterránea puede ser dividida en dos zonas principalmente. La zona no saturada que está conformada por los pequeños espacios en el suelo (intersticios), que son ocupados de forma parcial por el agua y aire, mientras que en la zona saturada todos los intersticios se encuentran ocupados por agua bajo una presión hidrostática. La extensión de la zona saturada inicia en la superficie más alta de saturación hasta el límite con el estrato impermeable.[34]

En un flujo estratificado generalmente se produce flujo de agua a través de varias capas, el ingeniero Henry Darcy intereso en el flujo del agua a través de agua de los medios porosos porque trabajo muchos años en el abastecimiento de agua de la ciudad francesa de Dijon, en la cual utilizaban filtros de arena para depurar el agua. En el año de 1986 presento un voluminoso informe sobre el tema donde en un pequeño apéndice incluyó la elaboración de sus experimentos y presento la obtención de la ley, que fue denominada Ley de Darcy en su nombre. Ese pequeño anexo se considera como el nacimiento de la hidrogeología.[35]

Los dos casos más sencillos del flujo a través de varias capas son cuando se considera el flujo paralelo a los contactos entre capas como se muestra en la Ilustración 36 o el flujo perpendicular a las capas como se muestra en la Ilustración 37. Si se supone que cada una de las capas es homogénea e isótropa, la permeabilidad equivalente (Conductividad hidráulica equivalente) es un valor global que se puede asignar al conjunto de capas como una unidad y se puede distribuir en K equivalente horizontal (K_h) o K equivalente vertical (K_v).[36]

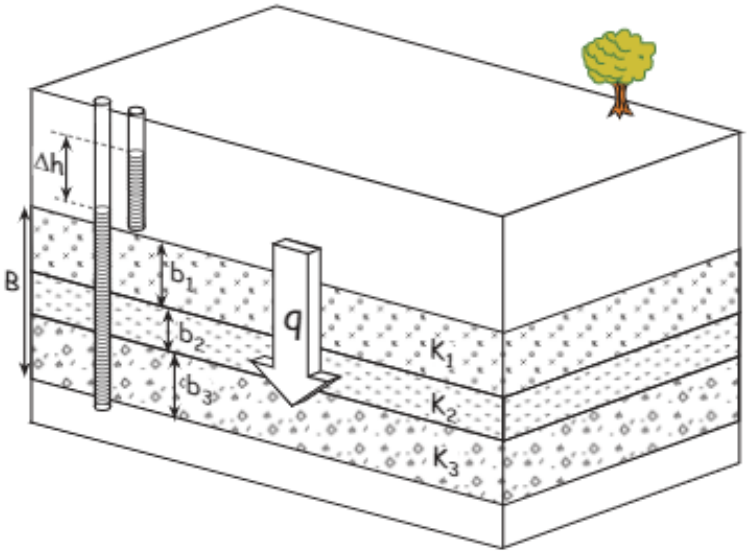
[34] IDEAM. Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas - Contenidos del Taller de Formación. 180 págs. diciembre 2015. Bogotá, D. C., Colombia, 2015, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
[35] SANCHEZ SAN ROMAN. F. Javier. Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca, 2017.391p.
[36] Ibíd.

Ilustración 36. Flujo paralelo a las Capas



Fuente: Hidrología Superficial Y Subterránea[37]

Ilustración 37. Flujo Perpendicular a las Capas



Fuente: Hidrología Superficial Y Subterránea[38]

[37] SANCHEZ SAN ROMAN. F. Javier. Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca, 2017.391p.
[38] Ibíd.

3.2.2.1.1. Ley de Darcy:

La ley de Darcy establece la relación macroscópica fundamental, y a partir de ella puede llegarse a expresar el flujo en forma de ecuaciones diferenciales. Cuando se realiza una definición de carácter macroscópico se trata el medio como un continuo con propiedades medias bien definidas; estas leyes se basan en la consideración de tres parámetros fundamentales: La permeabilidad, la porosidad y el coeficiente de almacenamiento.

La Ley de Darcy es también una "ley macroscópica que representa el comportamiento de un número elevado de poros, aunque no representa el comportamiento del agua dentro de cada poro y permite tratar el flujo subterráneo como un flujo no viscoso. Esta ley puede derivarse de las ecuaciones de Navier Stokes para fluidos viscosos si se tiene en cuenta la existencia del medio poroso y así mismo se le representa por sus valores medios".[39]

La ecuación que describe la ley de Darcy se describe a continuación donde el Δh puede obtenerse en régimen laminar.

$$v = k \times i \; = \; -k \times \frac{dh}{ds}$$

Ecuación 1. Velocidad de Flujo, Ley de Darcy

Donde,
v: Velocidad de flujo
i: Gradiente hidráulico
k: Permeabilidad o conductividad hidráulica

La Ley de Darcy se desarrolló con experimentos en cilindro rellenos de material poroso y ha sido constantemente confirmada por un número importante de investigadores.

En el desarrollo de la de los ensayos se tiene un cilindro vertical de sección constante A y longitud L, se hace circular agua en su interior con una diferencia de energía entre la entrada y la salida Δh, puede escribirse así:

$$v = k \times \frac{\Delta h}{L}$$

Ecuación 2. Velocidad de Flujo con Delta h, Ley de Darcy

[39] CUSTODIO, Emilio, LLAMAS, Manuel. Hidrología Subterránea. Barcelona, 1983. Tomo I. P. 449

Y el caudal que circula puede expresarse de la siguiente forma:

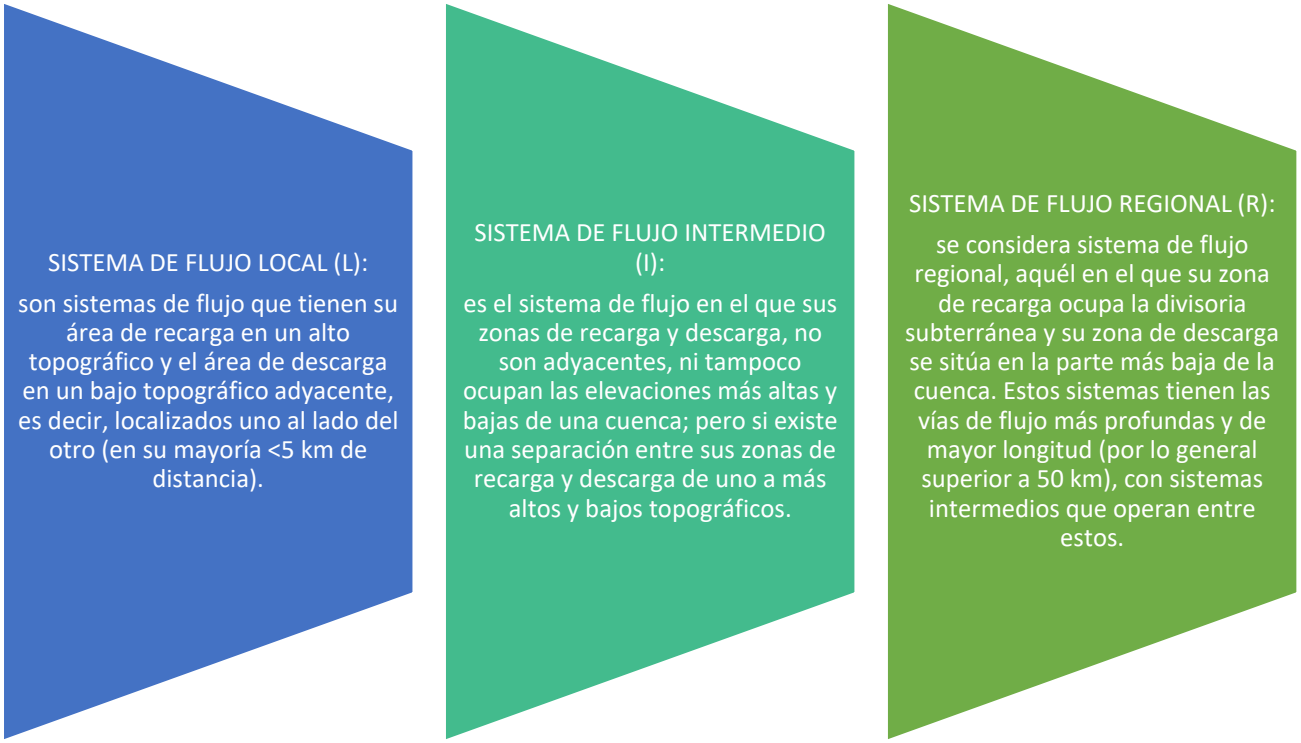
$$Q = v \times A \ = \ k \times A \times \frac{\Delta h}{L}$$

Ecuación 3. Caudal, Ley de Darcy

3.2.2.1.2. Determinación de los sistemas de flujo subterráneo

En el año de 1963, Tóth propone diferentes sistemas de flujo del agua subterránea, considerando desde el punto de vista teórico una gran cuenca superficial, que tienen las características que se notan en la Ilustración 38 e Ilustración 39. [40]

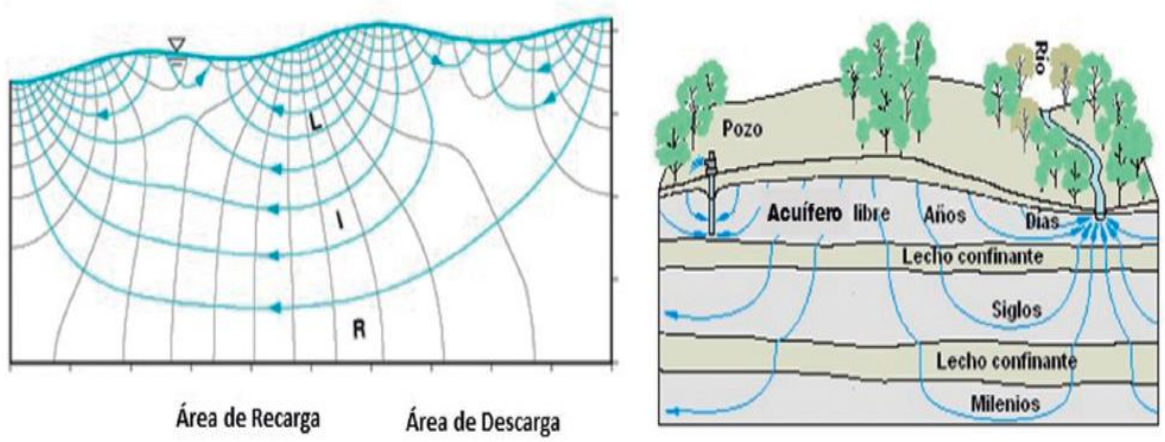
Ilustración 38. Sistemas de Flujo Subterráneo



Fuente: Guía Metodológica para la FPMAA[41] editado por Autores.

[40] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá. MinAmbiente, 2014; p.35
[41] Ibíd

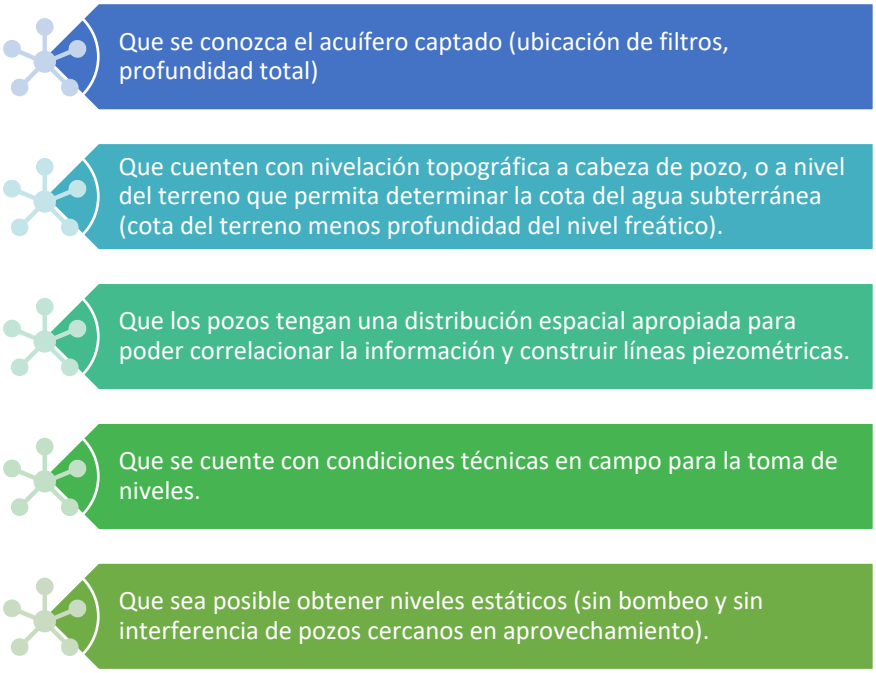
Ilustración 39. Diferentes Sistemas de Flujo de Agua Subterráneas a Escala Dentro de una Cuenca.



Fuente: Guía Metodológica para la FPMAA[42].

A partir de los diferentes datos obtenidos del inventario se puede establecer el sistema de flujo de aguas subterráneas dando prioridad a aquellos pozos o aljibes para que se cumplan con las condiciones que se pueden observar en la Ilustración 40: [43]

Ilustración 40. Condiciones a cumplir en un sistema de flujo de aguas subterráneas



Fuente: Elaboración propia

[42] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuiferos, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá.MinAmbiente, 2014; p.35
[43] Ibíd.

3.2.3. CÁLCULO DE LA RECARGA

La recarga se define como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Balek, 1988). La recarga a un acuífero puede darse naturalmente debido a la precipitación, a las aguas superficiales, es decir, a través de ríos y lagos, o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988; Custodio, 1997; Simmers, 1990; Lerner, 1990; Samper, 1997). Esto puede resumirse de la siguiente manera:

- Recarga directa o recarga difusa, proveniente del agua lluvia.
- Recarga concentrada o indirecta, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros.
- Flujos laterales, procedentes de otros acuíferos.
- Retorno de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución.
- Recarga Urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y alcantarillado.

La recarga natural de los acuíferos es un término básico del balance hídrico. Su conocimiento y evaluación constituye un problema extremadamente complejo que requiere identificar los mecanismos a través de los cuales tiene lugar dicho proceso, así como el tipo y distribución espacial de las diferentes fuentes de agua que intervienen en cada evento de recarga (Custodio, 1977).

3.2.3.1.1. Balance hídrico

El potencial de las aguas subterráneas de un acuífero representa la máxima cantidad de agua a sustraer del acuífero, para que no sea sobreexplotado. Dicho potencial se estima mediante la recarga al acuífero, que se determina conociendo, en primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje. En segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie. En tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero, que se encuentra ubicado debajo del suelo. Se plantea como metodología

para encontrar el balance hídrico del agua en un volumen de suelo la planteada por Gunther Shosinsky y Marcelino Losilla (1999) que considera la intercepción superficial, la infiltración, la evapotranspiración lluvia neta que se infiltra como variables para determinar la recarga potencial en el acuífero.

3.2.3.1.2. Retención superficial

La intercepción superficial se refiere a la cantidad de agua retenida por el follaje de las plantas en una determinada zona y está condicionada por la densidad y tipo de cobertura vegetal del suelo. Schosinsky y Losilla (2000) sugieren que en una zona con una cierta cobertura vegetal cualquier precipitación inferior a 5 mm/mes es retenida y no se convierte en infiltración. Además, se considera que la retención de la lluvia en follajes es de alrededor del 12% siempre y cuando se tenga una cantidad de precipitación mayor a la anteriormente expresada. (Butler, 1957) Esto se puede interpretar como:

$$Ret = Cfo * P\left(\frac{mm}{mes}\right)$$

Ecuación 4. Retención superficial

Donde,

$\mathrm{Cfo} = 0.12 \text{ si } \mathrm{P} > 5\mathrm{mm/mes}$

3.2.3.1.3. Coeficiente de Infiltración

La cantidad de precipitación que infiltra en el subsuelo está condicionada por el factor de coeficiente de infiltración, y la cual está sujeto a las condiciones de pendiente del terreno (Kp), vegetación existente (Kv), y tipo de suelo (Kfc). Cada uno de estos factores, para el método de Shosinsky y Losilla (1999) puede calcularse como sigue:

Fracción que infiltra por efecto de la pendiente del terreno:

$$K_{fc} = 0.267 \ln(f_c') - 0.000154(f_c') - 0.723$$

Ecuación 5.

El valor f'_c corresponde a la permeabilidad del suelo saturado en los primeros 30 cm de profundidad. Este valor se obtuvo mediante la caracterización de los suelos de la zona con ensayos de infiltración de Porchet. Se presenta a continuación el plano de la distribución de capacidades de infiltración caracterizadas.

- En la Tabla 24 se presenta la fracción que se infiltra por efecto de la cobertura vegetal

Tabla 24. Componentes del coeficiente de infiltración.

COMPONENTES EL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN (Schosinsky & Losilla, 2000)	
Por cobertura vegetal:	**Kv**
Cobertura con zacate menos del 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastozal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más del 75%	0,21

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000

- En la Tabla 25 se presenta la fracción que infiltra por efecto de la pendiente del terreno

Tabla 25. Componentes del coeficiente de infiltración.

COMPONENTES EL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN *(Schosinsky & Losilla, 2000)*		
Por pendiente	**Pendiente**	**Kv**
Muy plana	0,02%-0,06%	0,30
Plana	0,3%-0,4%	0,20
Algo plana	1%-2%	0,15
Promedio	2%-7%	0,10
Fuerte	>7%	0,06

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000

El coeficiente de infiltración C_i que se identifica como el porcentaje de precipitación que se convierte en infiltración, se puede determinar cómo se muestra en la Ecuación 6:

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc}$$

Ecuación 6. Coeficiente de infiltración.

Siendo C siempre inferior a 1.

La infiltración se puede calcular como se observa en la ecuación 7:

$$I = C_i * P_i$$

Ecuación 7. Infiltración

Donde,
P_i: Infiltración pluvial mensual

3.2.3.1.4. Infiltración Pluvial Mensual

Para el cálculo de la cantidad de precipitación que se convierte en infiltración pluvial se puede establecer la Ecuación 8.

$$P_i = C_i(P - Ret)$$

Ecuación 8. Precipitación

En esta se relaciona la retención superficial Ret, el coeficiente de infiltración C_i y la precipitación bruta que cae sobre la zona.

3.2.3.1.5. Escorrentía superficial

La teoría de infiltración plantea a la escorrentía como el exceso de volumen de agua una vez sucedido el proceso de infiltración, por lo tanto, esta se puede establecer como se presenta en la Ecuación 9:

$$Esc = P - Ret - Ci$$

Ecuación 9. Escorrentía

De lo anterior se puede ver que, si el coeficiente de infiltración es igual a 1, es decir que el 100% de volumen de agua disponible se infiltra, no se producirán fenómenos de escorrentía superficial.

3.2.3.1.6. Balance de humedad del suelo

Para el cálculo de esta se requiere la infiltración mensual al suelo generada por la lluvia, este debe hacerse acorde a los parámetros de infiltración también mostrados en la Tabla 26; posteriormente se debe conocer la capacidad de campo y el punto de marchitez del suelo mostrado a continuación. También se debe conocer la profundidad de las raíces extractoras de agua en el sitio de realización del balance en un área de 1 m² por la profundidad del suelo dada por la profundidad de las raíces mencionadas en la Tabla 27 la máxima humedad que puede tener un suelo que no se encuentre saturado es igual a la capacidad de campo, mientras que la mínima capacidad es la dada por el punto de marchitez mostrado a continuación.

Tabla 26. Punto de marchitez y capacidad de campo.

PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE Y CAPACIDAD DE CAMPO EN PORCENTAJE POR PESO DE SUELO SECO DE DIFERENTES TEXTURAS DE SUELOS *(Grassi, 1976)*			
Textura del suelo	**Porcentaje por peso de suelo seco**		
	PPM%	**CC%**	**Densidad aparente (g/cm3)**
Arenoso	2-6%	6-12%	1,55-1,80%
Franco-Arenoso	4-8%	10-18%	1,40-1,60%
Franco	8-12%	18-26%	1,35-1,50%
Franco-Arcilloso	11-15%	13-31%	1,30-1,40%
Arcillo-Arenoso	13-17%	27-31%	1,25-1,35%
Arcilloso	15-19%	31-39%	1,20-1,30%

Fuente: Grassi, 1976

Tabla 27. Profundidad de raíces.

PROFUNDIDAD RADICULAR DE DIFERENTES CULTIVOS	
Cultivo	**Metros**
Alfalfa	1-2m
Algodón	1-1,7m
Banano	0,5-0,8m
Caña de azúcar	1,20-2,0m
Fríjol	0,5-0,7m
Cebolla	0,3-0,5m
Cítricos	1,2-2,0m
Zacate	0,3-0,5m
Bosques	2,0-3,0m

Fuente: Grassi, 1976

3.2.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN

Se define como la transpiración de la planta cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo más la evaporación del suelo, está dada por la Ecuación 10:

$$ETPR = (HS - PM) * (ET)/(CC - PM)$$

Ecuación 10. Evapotranspiración

Dónde,

ETPR [mm/día]: Evapotranspiración potencial real
HS [%]: Humedad del suelo
ET [mm/día]: Evapotranspiración de la planta a capacidad de campo
CC [%]: Capacidad de campo

PM [%]: Punto de marchitez permanente

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, existen una serie de ecuaciones, algunas de ellas requieren una serie de datos, que pocas estaciones meteorológicas los tienen. Por este motivo, se utilizará la Ecuación 11 de Blaney & Criddle (ONU, 1972)

$$ETP\left(\frac{mm}{mes}\right) = (8.1 + 0.46T) * Ps$$

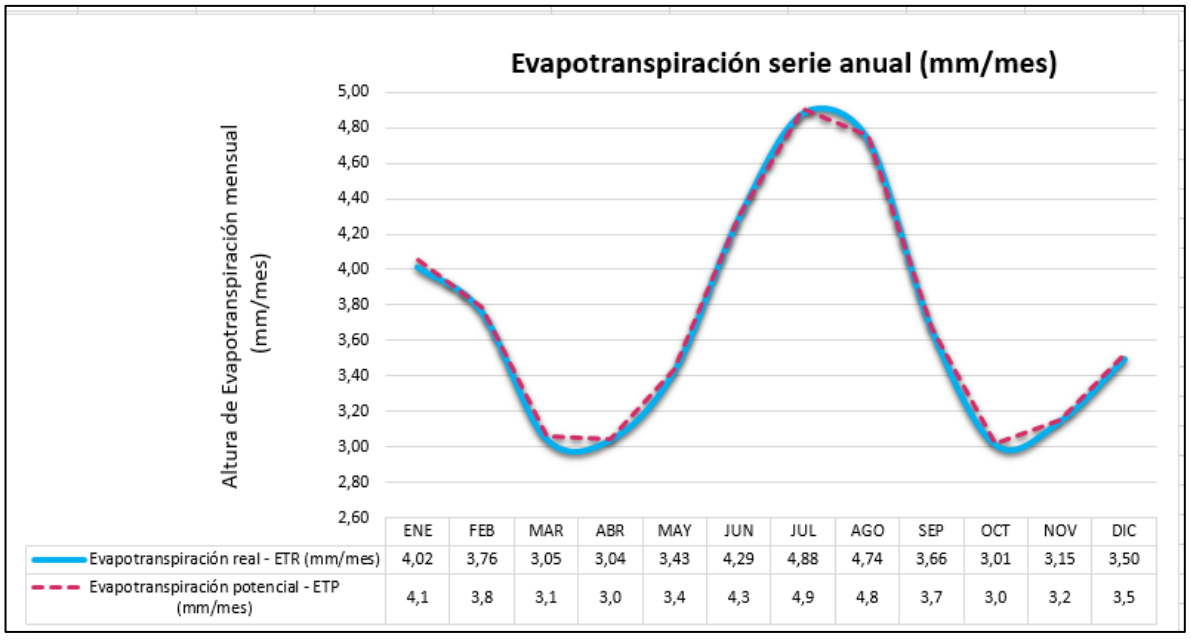
Ecuación 11. Evapotranspiración potencial

Donde:

ETP: Evapotranspiración potencial en [mm/mes]
T: Temperatura media mensual en [grados centígrados] (dato meteorológico)
Ps: Porcentaje de horas de luz solar mensual [%]

Utilizando la ecuación de Blaney & Criddle se encuentra la evapotranspiración potencial para el área de influencia con base en las temperaturas medias históricas y el porcentaje de horas de luz para el área de influencia, que se puede evidenciar en la Ilustración 41.

Ilustración 41 Ejemplo de Evapotranspiración anual.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Evapotranspiración real - ETR (mm/mes)	4,02	3,76	3,05	3,04	3,43	4,29	4,88	4,74	3,66	3,01	3,15	3,50
Evapotranspiración potencial - ETP (mm/mes)	4,1	3,8	3,1	3,0	3,4	4,3	4,9	4,8	3,7	3,0	3,2	3,5

3.2.4.1.1. Recarga potencial a los sistemas hídricos subterráneos

Para convertir la humedad del suelo, punto de marchitez y capacidad de campo a milímetros, de porcentaje por peso de suelo seco, tal como aparecen en tablas o laboratorios, a porcentaje por volumen, mediante la Ecuación 12:

$$\%_{\text{por Volumen}} = (\%_{\text{peso de suelo seco}} * \text{Densidad Aparente})$$

Ecuación 12. Porcentaje por volumen

Si la cantidad de infiltración de la lluvia es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y llenar la necesidad de evapotranspiración, el sobrante del agua que infiltra, percola para recargar al acuífero. Esto es llamado coeficiente de humedad (Ch) que se presenta en la Ecuación 13, donde:

$$Ch = \frac{humedad\ del\ suelo - punto\ de\ marchitez}{capacidad\ de\ campo - punto\ de\ marchitez}$$

Ecuación 13. Coeficiente de humedad

Para el cual se tendría un coeficiente de humedad a final de mes llamado C1 definido en la Ecuación 14 como:

$$\text{C1} = (\text{HSi} - \text{PM} + \text{Pi}) / (\text{CC} - \text{PM})$$

Ecuación 14. Coeficiente de humedad a final de mes

Donde,

C1: Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.
Hsi: Humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial en [mm].
PM: Punto de marchitez en [mm].
Pi: Precipitación que infiltra en [mm/mes].
CC: Capacidad de campo en [mm].

Pero si se considera que se ocurre la ETP una vez ocurrida la infiltración el coeficiente estaría definido por la Ecuación 15 y Ecuación 16.

$$C2 = (HSi - PM + Pi - ETR1) / (CC - PM)$$

Ecuación 15. Coeficiente de humedad a final del mes, después de ocurrida la evapotranspiración

$$ETR1 = (C1)(ETP)$$

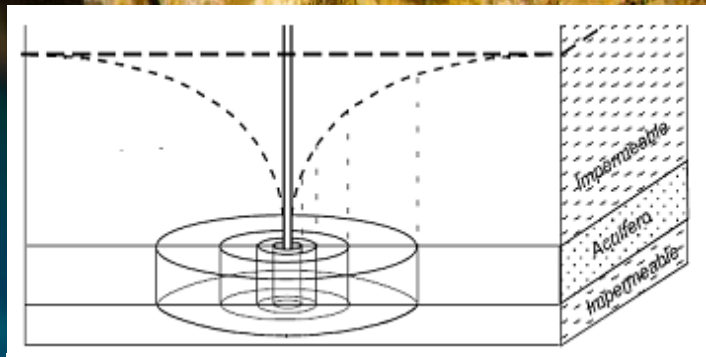
Ecuación 16. Evapotranspiración potencial real

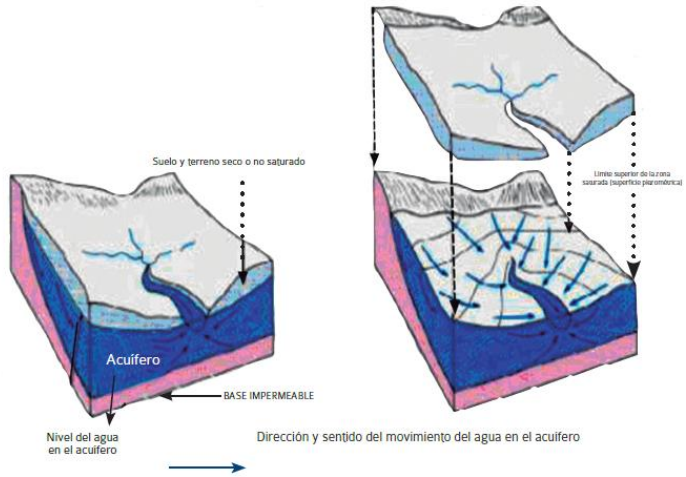
Donde,

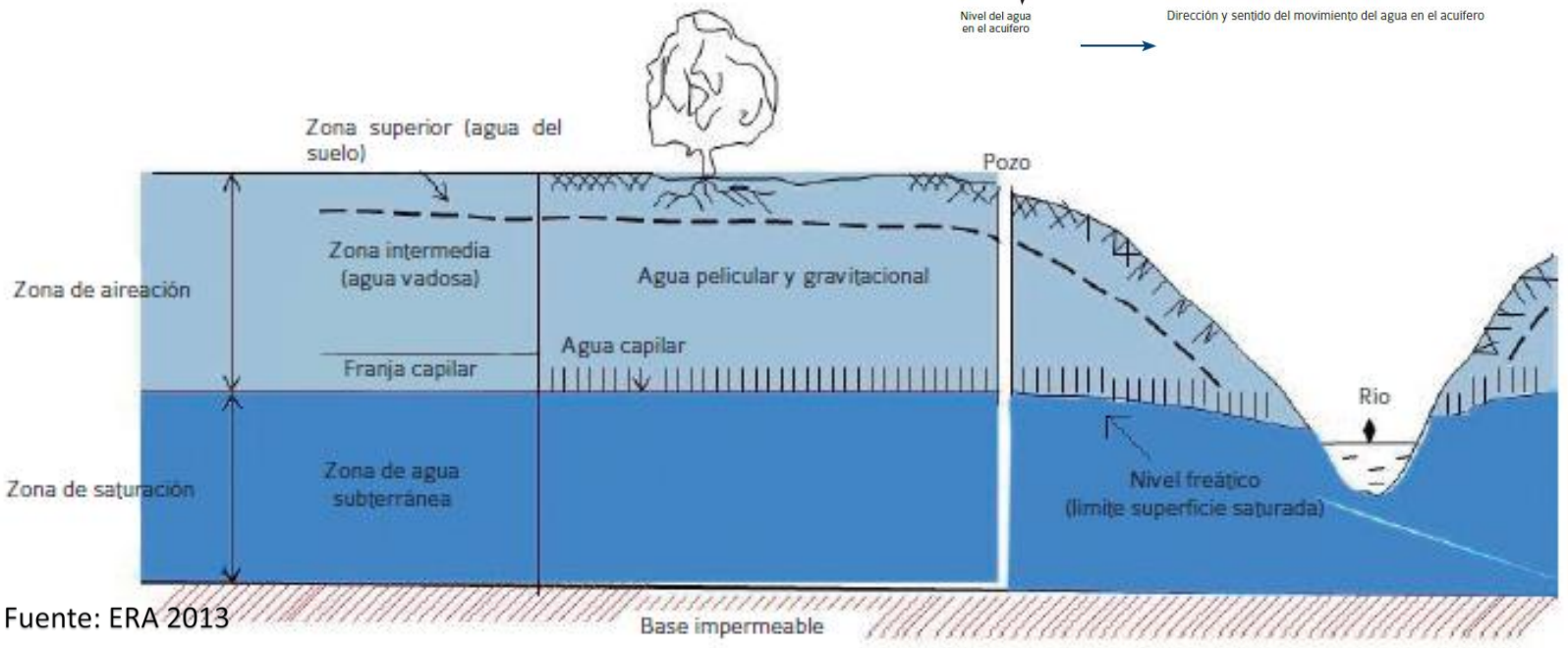
C2: Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración.
ETR1: Evapotranspiración potencial real [mm/mes], considera la humedad correspondiente al coeficiente C1.
ETP: Evapotranspiración potencial [mm/mes].

CAPÍTULO 4.

Modelo Hidráulico





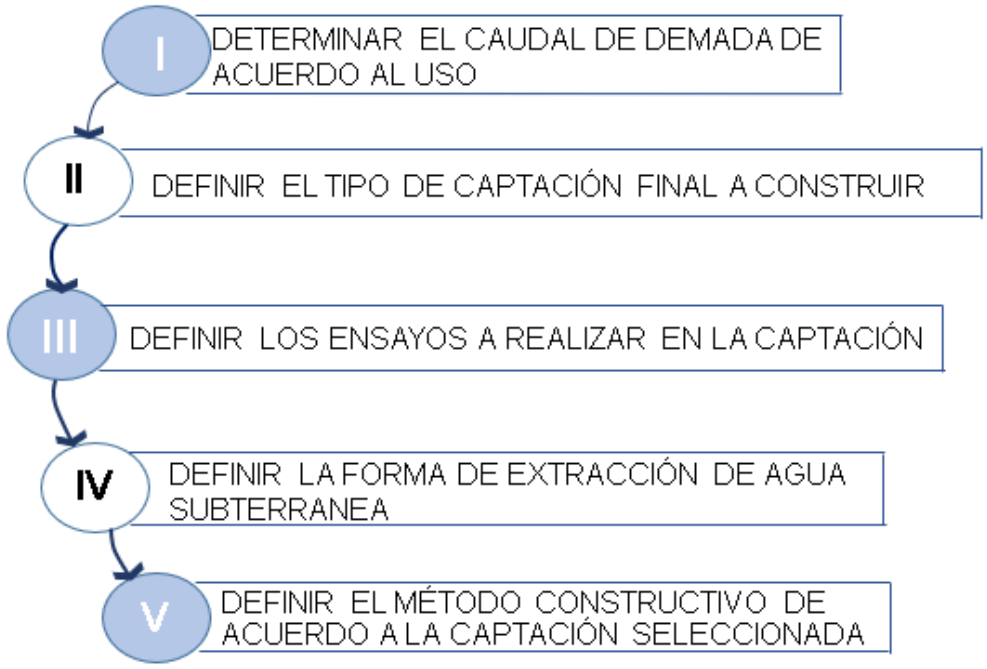


Fuente: ERA 2013

4. MODELO HIDRÁULICO

El modelo hidráulico está comprendido por 5 etapas que se presentan en la Ilustración 42, este inicia con la importancia de conocer el caudal necesario para el uso al cual se realizará la extracción de agua subterránea, indicando los diferentes tipos de captaciones y sus diferentes formas de extracción. Un componente muy importante en el modelo hidráulico corresponde a la definición de las variables hidráulicas como Transmisividad (T), conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S) que me permiten determinar el desplazamiento del agua en el suelo, definiendo la velocidad con la que el agua fluye a través de los poros. La información de las variables hidráulicas es tomada por diferentes ensayos realizados en el lugar donde se ubica la fuente de captación, como es el caso de las pruebas de bombeo, ensayo de Lugeon, ensayo de Lefranc y ensayo de Slug.

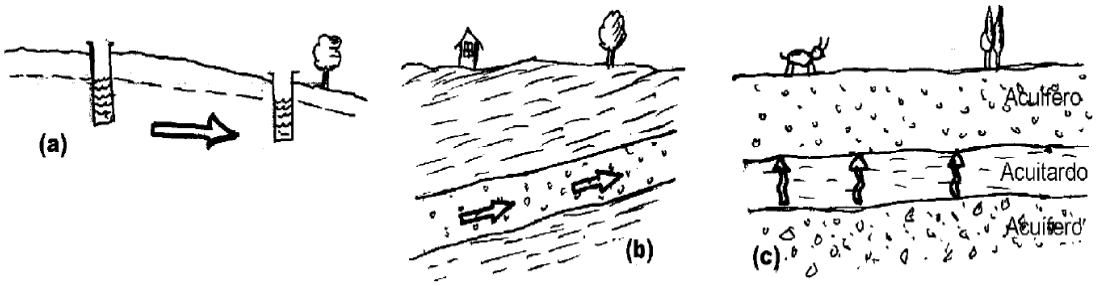
Ilustración 42. Etapas que definen el modelo hidráulico



Fuente: Elaboración propia

De forma natural pensamos que el agua circula desde una ubicación más alta hacia una ubicación más baja, debido a que este es el comportamiento de las aguas superficiales, y muchas veces esta aproximación se cumple en las aguas subterráneas. Sin embargo, es frecuente encontrar que el agua subterránea circule hacia arriba como se evidencia en la Ilustración 43.

Ilustración 43. El agua Subterránea no siempre circula de los puntos más altos hacia los más bajos



Fuente: Hidrología Superficial Y Subterránea[44]

Realmente el comportamiento del agua se realiza desde los puntos en los que se tiene más energía hacia aquellos en los que tiene menor energía. “La energía total de una unidad de volumen de agua será la suma de la energía potencial (debida a su posición en el espacio), la energía cinética (debida a su velocidad), a energía de presión (como la energía que almacena un muelle cuando está comprimido)” [45]. En el flujo de agua, debido a que la velocidad es tan lenta, se puede decir que la energía cinética es despreciable si se compara respecto a la energía potencial y la energía de presión.

De acuerdo a la definición anterior podemos decir que la energía total por unidad de masa corresponde a la adición de energía potencial con energía de presión; esta energía total por unidad de masa se denomina potencial hidráulico Φ y es igual a la altura de la columna de agua (h) respecto a un nivel de referencia determinado multiplicado por la aceleración de la gravedad. Al definir como una constante la aceleración de la gravedad (g) se puede definir entonces que el cambio en h refleja exactamente la variación del potencial hidráulico. [46]

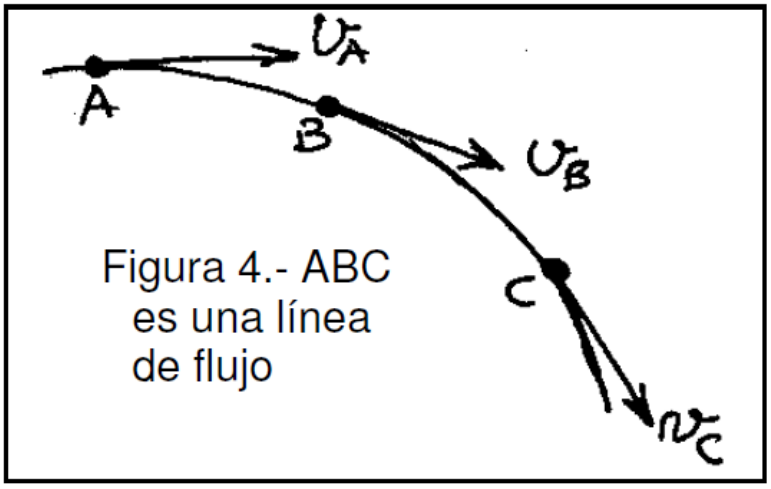
4.1. LÍNEAS DE FLUJO Y SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

4.1.1. LÍNEAS DE FLUJO

Se define línea de flujo a la envolvente de los vectores de velocidad para un instante determinado, en cuanto a la trayectoria esta se define como los caminos que sigue las partículas de agua a lo largo de su recorrido, para un régimen permanente las trayectorias coinciden con las líneas de flujo, mientras que en régimen variable estas no pueden coincidir, como se puede observar en la Ilustración 44. [47]

[44] SANCHEZ SAN ROMAN. F. Javier. Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca, 2017.
[45] Ibíd.
[46] SANCHEZ SAN ROMAN. F. Javier. Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca, 2017.
[47] Ibid.

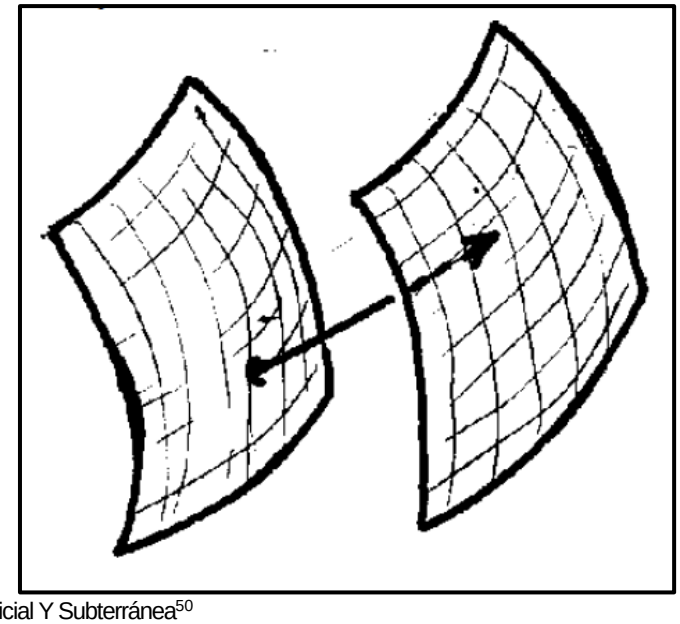
Ilustración 44. Línea de Flujo ABC



Fuente: Hidrología Superficial Y Subterránea[48]

Respecto a la superficie equipotencial, esta corresponde a un lugar geométrico de los puntos del espacio que tienen un mismo potencial hidráulico Φ; por lo cual el flujo se producirá perpendicularmente a las superficies equipotenciales, buscando el mayor gradiente hidráulico, como se evidencia en la Ilustración 45. [49]

Ilustración 45. Superficies Equipotenciales



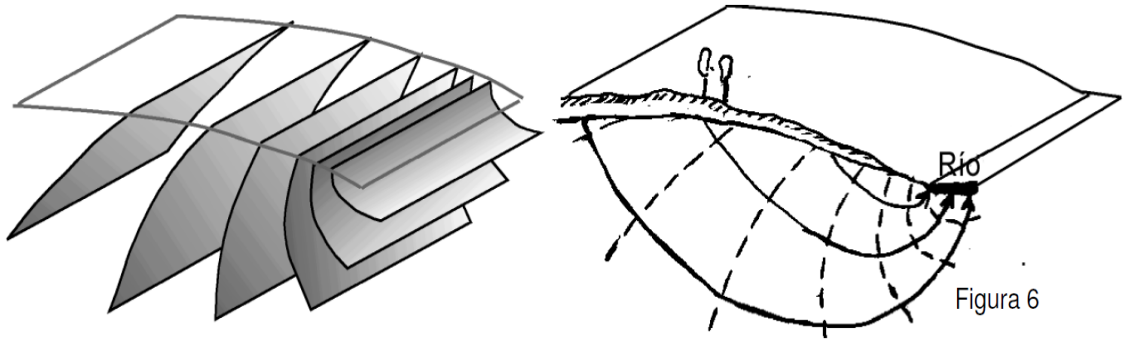
Fuente: Hidrología Superficial Y Subterránea[50]

[48] SANCHEZ SAN ROMAN. F. Javier. Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca, 2017.
[49] Ibid
[50] Ibid

4.1.2. REDES DE FLUJO

De acuerdo con Sánchez Javier, “Una red de flujo es una representación esquemática del flujo en un plano mediante líneas de flujo y líneas equipotenciales. Las líneas equipotenciales son la traza de las superficies equipotenciales al ser cortadas por el plano en que se dibuja la red de flujo. Como se observa en la Ilustración 46, el flujo siempre es tridimensional, así que las redes de flujo, en un plano, pueden trazarse en un plano horizontal o en un corte vertical.”[51]

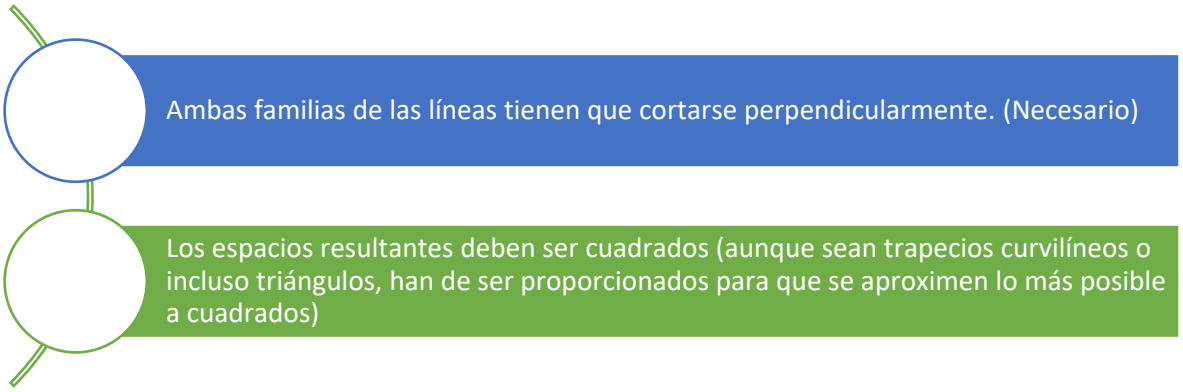
Ilustración 46. Superficie Equipotenciales Bajo Una Ladera y el Correspondiente Perfil don Red de Flujo



Fuente: Hidrología Superficial Y Subterránea[52]

Para el trazado de una red de flujo se deben cumplir con las condiciones que se presentan a continuación en la Ilustración 47:

Ilustración 47. Condiciones para el trazado de una red de flujo



Fuente: Elaboración propia

[51] SANCHEZ SAN ROMAN. F. Javier. Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca, 2017.
[52] Ibíd.

Actualmente, existen diferentes programas que permiten dibujar y modelar las redes de flujo automáticamente, como por ejemplo MODFLOW que consiste en un código de modelado de aguas subterráneas en 3D basado en diferencias finitas que fue desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). En este software en específico se pueden realizar simulaciones en flujo estático y transitorio de un acuífero.

A continuación, se dará inicio al apartado de caudal demandado por el tipo de captación

4.2. CAUDAL DEMANDADO

El caudal demandado corresponde al tipo de caudal que se requiere para el uso de agua que se dará en atención a la necesidad de la persona natural o jurídica que esté buscando realizar el aprovechamiento del recurso, es decir, si, se debe establecer cuánta agua requiero con base en el número de personas a atender; si se trata de una captación para uso doméstico o si se requiere realizar un análisis detallado de caudal para una industria, por ejemplo.

Para definir el caudal de uso de acueducto doméstico se puede utilizar diferentes metodologías, una de ellas corresponde a la indicada en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y su actualización en la Resolución 0330 de 2017 y Resolución 0799 de 2021. Para describir de forma breve en que consiste esta metodología se deben realizar dos definiciones, dotación neta y dotación bruta.

4.2.1. DOTACIÓN NETA

“Es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante, sin considerar las pérdidas técnicas que ocurran en el sistema de acueducto”[53].

4.2.2. DOTACIÓN BRUTA

“Es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante, considerando para su cálculo el porcentaje de pérdidas técnicas que ocurran en el sistema de acueducto.”[54]

Como primer paso, de acuerdo con el Artículo 43 de la Resolución 0330 de 2017, la dotación neta debe determinarse haciendo uso de los registros históricos que se tengan, de los consumos de agua potable, de la cantidad de suscriptores, que se encuentra disponible en la entidad prestadora de servicio de acueducto. De no

[53] Minvivienda, «MINISTERIO DE VIVIENDA, INICIO, Resolución 0799 de 2021, Bogotá,2021.
[54] Minvivienda, «MINISTERIO DE VIVIENDA, INICIO, Resolución 0799 de 2021, Bogotá,2021.

contar con esa información se puede utilizar la dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar, como se indica en la Tabla 28.

Tabla 28. Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida

ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR ZONA ATENDIDA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/HAB*DÍA)
> 2000 M.S.N.M	120
1000-2000 m.s.n.m	130
< 1000 m.s.n.m	140

Fuente: Resolución 0330 de 2017.[55]

El segundo paso, en concordancia con el Artículo 44 de la Resolución 0330 de 2017, corresponde a la determinación de la dotación bruta para el diseño de cada uno de los componentes que conforman el sistema de acueducto, para lo cual se debe utilizar la Ecuación 17:

$$D_{bruta} = d_{neta}/(1 - \%p)$$

Ecuación 17. Dotación Bruta

Donde,

D_{bruta}: Dotación bruta

D_{neta}: Dotación neta

%p: Porcentaje de pérdidas técnicas máximas para diseño (No deberán superar el 25%)

4.2.3. CAUDALES DE DISEÑO

Los caudales de diseño de acuerdo con la Resolución 0330 de 2017 se establecen en la Tabla 29.

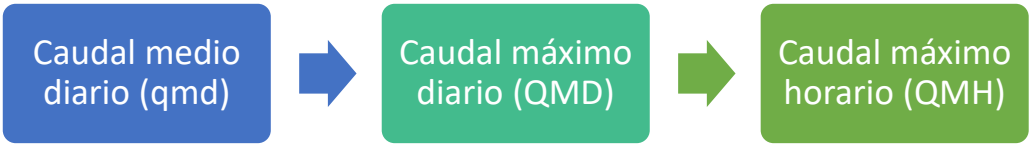
Tabla 29. Caudales de Diseño

COMPONENTE	CAUDAL DE DISEÑO
Captación fuente superficial	Hasta 2 veces QMD
Captación fuente subterránea	QMD
Desarenador	QMD
Aducción	QMD
Conducción	QMD
Tanque	QMD
Red de Distribución	QMH

Fuente: Resolución 0330 de 2017[56]

[55] Minvivienda, «MINISTERIO DE VIVIENDA, INICIO, Resolución 0330 de 2017, Bogotá,2017.
[56] Minvivienda, «MINISTERIO DE VIVIENDA, INICIO, Resolución 0330 de 2017, Bogotá,2017.

Con el fin de diseñar diferentes estructuras hidráulicas de sistemas de acueductos, se debe seleccionar el caudal adecuado que combine las necesidades de la población a atender y el coste del mismo, para lo cual se trabajan tres tipos de caudales como son:[57]



Según el parágrafo 2 artículo 47 de la Resolución 0330 de 2017

> *"Los factores de mayoración K1 y K2 deben calcularse para cada caso con base en los registros históricos de macromedición. En condiciones excepcionales en las que dicha información no esté disponible, debe justificarse la selección de los valores empleados.*
>
> *Para poblaciones menores o iguales de 12,500 habitantes, al periodo de diseño, en ningún caso el factor K1 será superior a 1.3 ni el factor K2 superior a 1.6. Para poblaciones mayores de 12.500 habitantes, al periodo de diseño, en ningún caso el factor K1 será superior a 1.2 ni el factor K2 superior a 1.5"*

A continuación, se presenta la definición de factor de mayoración, caudales y el cálculo de los caudales.

4.2.3.1.1. Factor de Mayoración (K1, K2)

Este es un factor que, como su nombre lo indica, mayora el valor de caudal medio diario, donde y contempla la variación que se pueda presentar en el caudal máximo diario, este valor no debe ser superior a 1.3.

Por otra parte, los valores de K2 obedecen a contemplar los picos de caudal horario que se pueden presentar en un sistema de acueducto, este depende de si la población es homogénea o heterogénea, entre otros factores, su valor debe ser inferior a 1.6.

4.2.3.1.2. Caudal medio diario

Es el caudal obtenido del promedio de un año de registros y se convierte en la base de caudal máximo diario y máximo horario, Para calcular el caudal se presenta la Ecuación 18: [58]

[57] LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.
[58] LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.

$$qmd\ {}^{l}/_{s} = \frac{Dotación\ \left(\frac{L}{Hab} * día\right) xPoblación(\#\ Habitantes)}{86400}$$

Ecuación 18. Caudal Medio Diario

4.2.3.1.3. Caudal máximo diario

Corresponde a la demanda máxima que se presenta en un día del año, el cual representa el día con mayor consumo en un año y se calcula con la Ecuación 19: [59]

$$QMD\ {}^{l}/_{s} = qmd * K1$$

Ecuación 19. Caudal Máximo Diario

4.2.3.1.4. Caudal máximo horario

Este valor corresponde a la demanda máxima que se presenta en una hora durante un año, el cual se puede determinar con la Ecuación 20: [60]

$$QMH\ {}^{l}/_{s} = QMD * K2$$

Ecuación 20. Caudal Máximo Horario

Como se indica en la Tabla 29, para determinar el caudal de captación será el caudal máximo diario, con este valor se puede conocer la demanda que se requiere en el punto de agua subterránea elegido. En el caso de industrias u otros usos se debe realizar el cálculo de caudal de acuerdo con el destino final de demanda de agua.

Una vez definido el valor de caudal, es importante tomar conciencia de que este recurso es vital y no debe ser utilizado en actividades que genere el desperdicio de agua en acciones que no se contemplaron para el uso calculado de diseño.

El valor de caudal obtenido también define el tipo de captación en conjunto con la profundidad de la tabla de agua, por lo cual si el valor de caudal es bajo y si a esto se suma que se encuentra a una profundidad importante, superior a los 100 m, por ejemplo, esto puede generar costos muy altos en la extracción si solo se requiere para el uso doméstico de una sola vivienda. En este punto se debe considerar si es conveniente continuar con la posibilidad de obtención de agua subterránea o si, por el contrario, no es viable desde la parte económica o hidrogeológica, hidrológica e hidráulica.

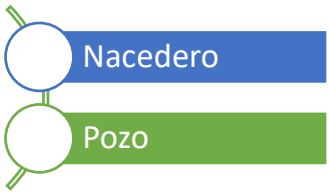
[59] LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.
[60] LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.

4.3. TIPO DE CAPTACIÓN

En este apartado se abarca los tipos de captación presentes en aguas subterráneas, indicando cuáles son las formas más comunes de extracción de agua, bien sea por el método de baldeo o por bombeo. La selección del tipo de extracción obedece al tipo de captación, la profundidad de la tabla de agua y del costo económico que requiere la extracción.

Otro factor importante para considerar pertenece a las condiciones del lugar, ya que, si en la zona en la que se encuentra un punto de agua subterránea se requiere realizar una extracción por bombeo y esta demanda una bomba eléctrica, se debe verificar la cobertura en la zona del suministro de energía. Este es un punto de validación que ayuda a definir si es viable el tipo de extracción requerida en el acuífero.

El tipo de captación se clasifica en dos grandes grupos de acuerdo con su construcción, es decir, si es una captación natural la cual surge a superficie o si, por el contrario, debe ser construida por el hombre. Como se muestra a continuación:

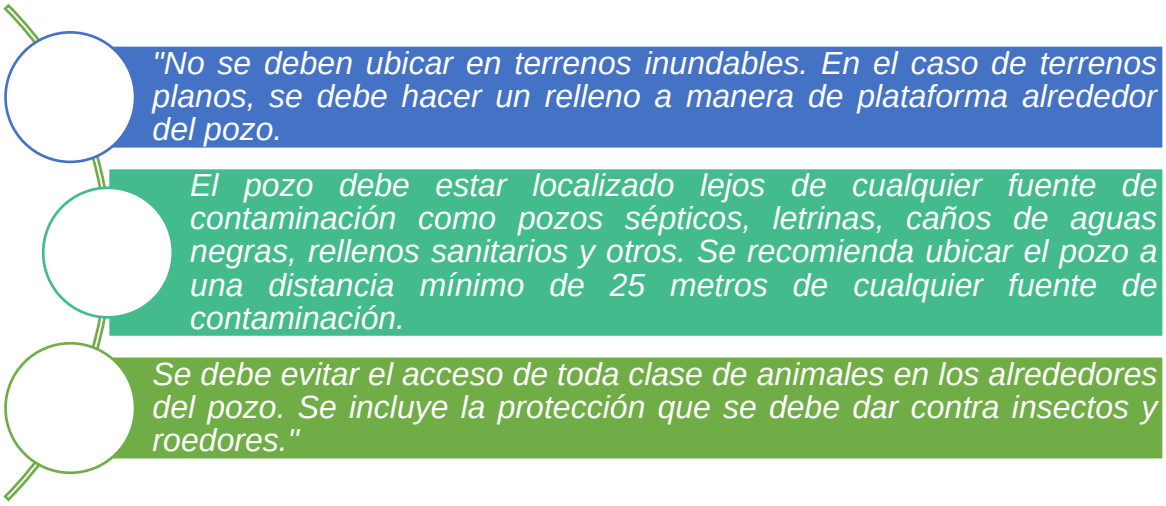


Para el desarrollo de los tipos de captación se debe definir un pozo, el cual es básicamente un agujero, excavación o túnel vertical que perfora la tierra hasta una profundidad suficiente para alcanzar un recurso, ya sea agua subterránea u otras sustancias, como petróleo[61]. Se busca alcanzar un estrato o formación rocosa que se encuentre saturado en el recurso buscado[62]

La localización de los pozos presenta algunas normas generales para su localización y protección, algunas de ellas son:

[61] Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. Lima, Perú.
[62] Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física (8° edición). Madrid, España: Pearson Educación.

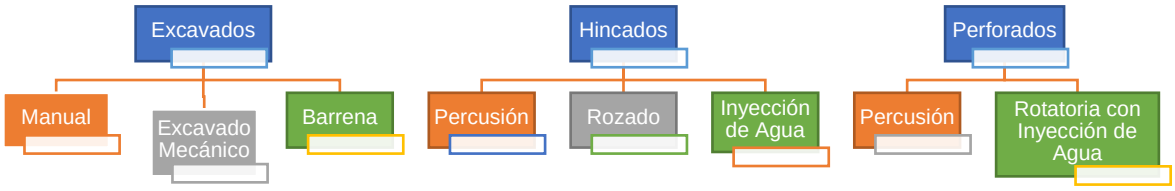
Ilustración 48. Algunas normales generales para la localización de los pozos.



Fuente: Elaboración propia

El agua que satura las formaciones rocosas migra hacia el pozo y de este, puede ser bombeada hacia la superficie. En la Ilustración 49, se presenta la clasificación de los pozos de agua subterránea según su construcción.

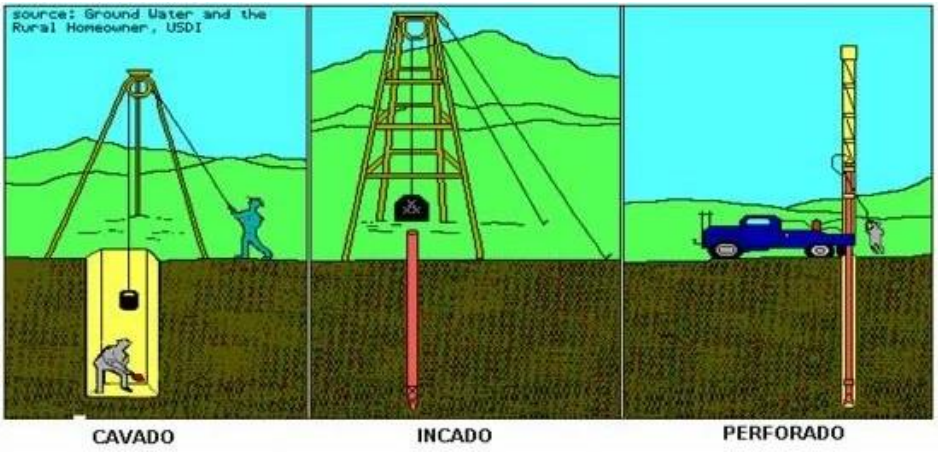
Ilustración 49. Clasificación de pozos de agua subterránea según su construcción



Fuente: Elaboración propia

Con base en la clasificación anterior, en la Ilustración 50Ilustración 50 se presenta la representación gráfica de los tipos de pozos.

Ilustración 50. Tipos de Pozos según su Construcción



Fuente: Fibras y normas de Colombia

Una vez clasificados los tipos de pozos a continuación, se describen los diferentes formas de captación y sus respectivos métodos de extracción.

4.3.1. NACEDERO (MANANTIAL)

Se denomina nacedero a la surgencia superficial de agua que proviene de un origen subterráneo y que se desplaza a través de los diferentes planos de estratificación, discontinuidades de rocas como grietas, fracturas o cambios en la litología en lugares en los que el nivel freático es cortado por la superficie topográfica.[63] En la Ilustración 51 se puede observar un ejemplo de manantial.

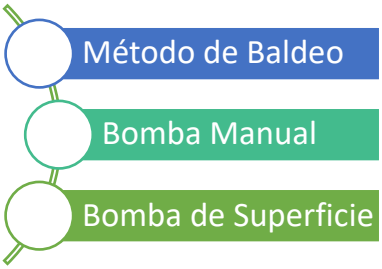
Ilustración 51. Manantial el Sereno

Fuente: Carsucre

[63] IDEAM. Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas - Contenidos del Taller de Formación. 180 págs. diciembre 2015. Bogotá, D. C., Colombia 2015, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.

4.3.1.1.1. Sistemas de Extracción en Nacederos

Los sistemas de extracción de agua subterránea para los nacederos se pueden observar a continuación:



4.3.2. ALJIBES (POZOS EXCAVADOS)

Son pozos artesanales y se conocen frecuentemente como aljibe, debido a que estos se encuentran operados de forma manual a través de equipos de bombeo manuales y en ocasiones equipos mecánicos o que simplemente realizan la extracción de agua con un recipiente directamente en el acuífero. Este tipo de pozos presenta excavaciones manuales en sección circular que varía entre diámetros de 0.8 m y 1.5 m. En la Ilustración 52 se puede observar un aljibe típico.

Ilustración 52. Aljibe

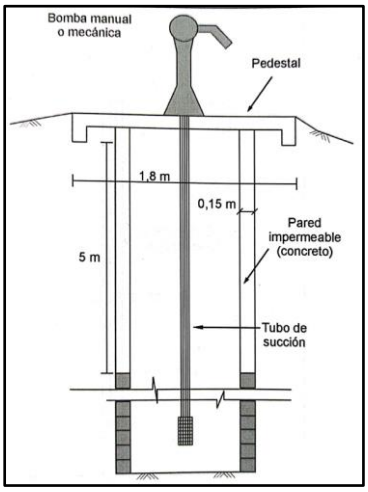
Fuente: Gidahatari.[64]

Este tipo de pozos pueden presentar profundidades entre 3.5 m y 10 m, debido a que son fuentes someras, son fácilmente contaminables, por lo cual se debe en lo posible buscar mayores profundidades. De acuerdo con el libro de Ricardo López Cualla “Con el fin de Con el fin de evitar la contaminación superficial, el pozo debe ser revestido en su parte superior (los primeros 3.5 metros). El material de

[64] GIDAHATARI, « ¿Cómo el metano entra a los pozos de agua?,» [En línea]. Available: https://gidahatari.com/ih-es/como-el-metano-entra-a-los-de-pozos-de-agua

revestimiento puede ser metal, concreto, de cemento o de gres, o ladrillo.” [65] En la Ilustración 53, se presenta un pozo con revestimiento en concreto y sus dimensiones más frecuentes.

Ilustración 53. Pozo Excavado con Camisa de Concreto

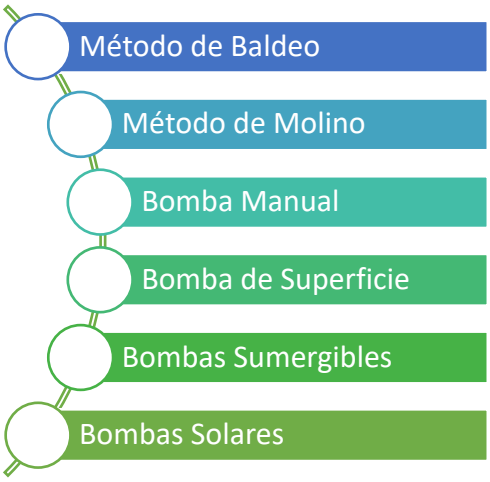


Fuente: Ricardo López Cualla[66]

4.3.2.1.1. Sistemas de Extracción en Aljibes

En la extracción de agua subterránea para los aljibes se pueden implementar las siguientes metodologías de extracción que se mencionan en la Ilustración 54:

Ilustración 54. Metodologías de extracción en aljibes



Fuente: Elaboración propia

[65] LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.
[66] LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.

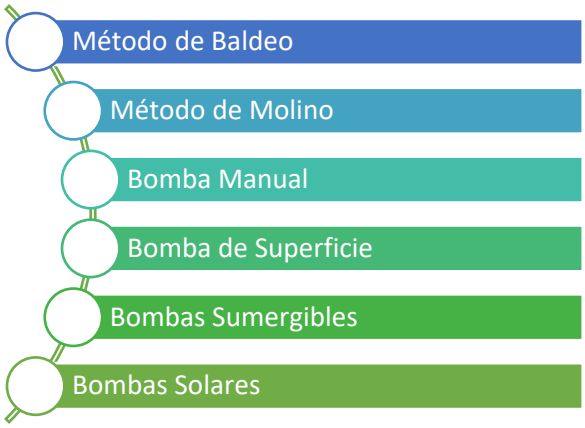
4.3.3. POZOS BARRENADOS O TALADRADOS

Son pozos de baja profundidad que se diferencian de los aljibes por el método de construcción, toda vez que estos pozos presentan un diámetro menor. En su construcción se puede emplear un barreno o taladro de movimiento manual o mecánico. Al igual que los aljibes por su baja profundidad deben presentar un revestimiento en concreto que evite la contaminación del agua del pozo.

4.3.3.1.1. Sistemas de Extracción en Pozos Barrenados

En la extracción de agua subterránea para pozos barrenados se pueden implementar las siguientes metodologías de extracción mencionadas en la Ilustración 55:

Ilustración 55. Metodologías de extracción en pozos barrenados



Fuente: Elaboración propia

4.3.4. POZOS HINCADOS

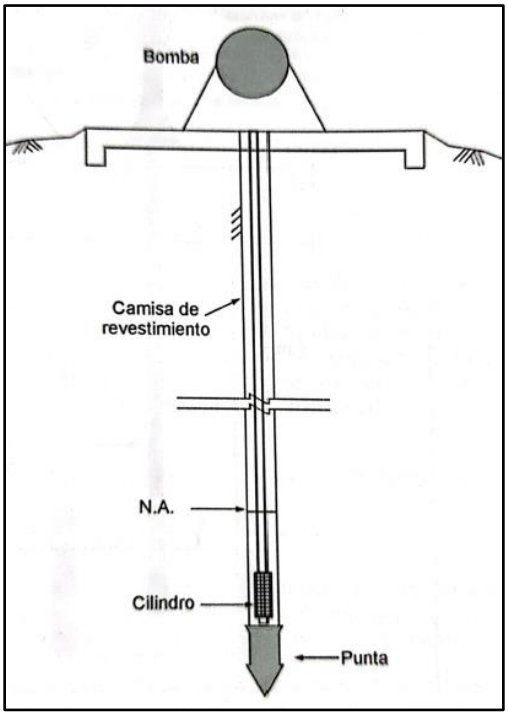
Los pozos hincados son captaciones en las cuales el tipo de perforación está basado en la colocación de tuberías generalmente galvanizadas de alta resistencia o hierro forjado y que cuentan con una punta en su extremo interior o punta en sistema de rejilla, la cual permite que la tubería se va hincando a golpes, es usada generalmente en estratos arenosos en los que otro tipo de perforación no podría mantener las paredes del pozo de manera estable, con este sistema la tubería va que dando instalada de forma inmediata, como se observa en la Ilustración 56.[67]

La desventaja de este tipo de perforaciones es que solo permite tuberías pequeñas generalmente de 2 a 3 pulgadas y las profundidades son bajas, cercanas a los 25 m, Al hincar la tubería se coloca una punta que es de mayor diámetro que la tubería en la cual se perforan orificios que presentan diámetros de 1/8 a 1/16” que permiten el

[67] INGENIERIAREAL, «tipos de pozos, [TIPOS DE POZOS PARA EXTRAER AGUA SUBTERRANEA] Pozos Hincados,» [En línea]. Available: https://ingenieriareal.com/tipos-de-pozos-para-extraer-agua-subterranea/.

ingreso de agua y retienen las partículas de arena del acuífero.[68]

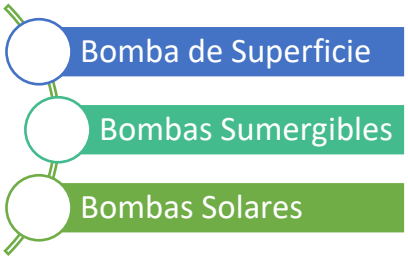
Ilustración 56. Pozo Hincado



Fuente: Ricardo López Cualla

4.3.4.1.1. Sistemas de Extracción en Pozos Hincados

Para la extracción de agua subterránea en pozos hincados se pueden implementar las siguientes metodologías de extracción:



4.3.5. POZOS PERFORADOS

Se denominan pozos perforados a aquellas perforaciones que utilizan maquinaria con diferentes tipos de rocas, para diversos tipos de materiales identificados previamente en la etapa de investigación, dentro de los pozos perforados se pueden

[68] LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.

encontrar diferentes metodologías para su perforación, siendo de las más conocidas las siguientes:

- Brocas de tungsteno con diamante, utilizado par rocas muy duras.
- Brocas de tungsteno con carburo, utilizado para rocas medias a duras.
- Perforación con aire comprimido.

  Este tipo de perforación es habitualmente utilizado en suelos consolidados, sin embargo, puede aplicarse también en suelos granulares si se utilizan tuberías de revestimiento que cumplen la función de soportes de la pared del pozo.

  Esta tecnología puede ser capaz de levantar el material de la perforación generado por la herramienta, debido a que el aire comprimido es un fluido compresible y levemente viscoso.

  Las profundidades óptimas para esta tecnología están entre 0 hasta los 600 metros, y su diámetro óptimo se encuentra entre 152 mm (6 Pulgadas) hasta los 375 mm (14 Pulgadas). Un ejemplo de pozo perforado se puede observar en la Ilustración 57.

Ilustración 57. Pozo Perforado

Fuente: Massenzaperforadoras[69]

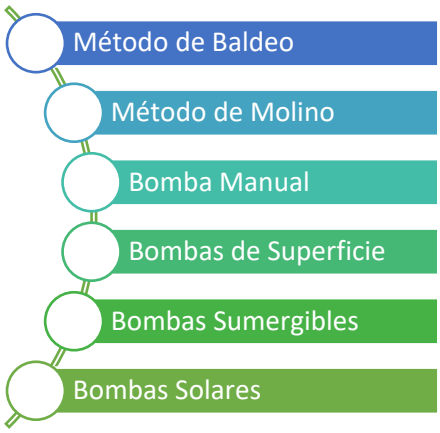
Dentro del proceso de perforación se debe contemplar la extracción de los sedimentos triturados, esta etapa es clave en el proceso de la perforación, toda vez que podemos extraer la totalidad del material de corte dentro del pozo aprovechando de forma simultánea la recuperación de las muestras cada 1 m o 5 m

[69] MASSENZAPERFORADORAS, «Perforación por aire comprimido [Metodos de Perforación] Perforación por aire comprimido,» [En línea]. Available: https://www.massenzaperforadoras.es/perforacion-por-aire-comprimido/.

dependiendo del requerimiento y análisis a realizar por el geólogo, con el cual podrá elaborar el perfil litológico del pozo, con el cual se obtiene finalmente la secuencia estratigráfica de los diferentes tipos de rocas.

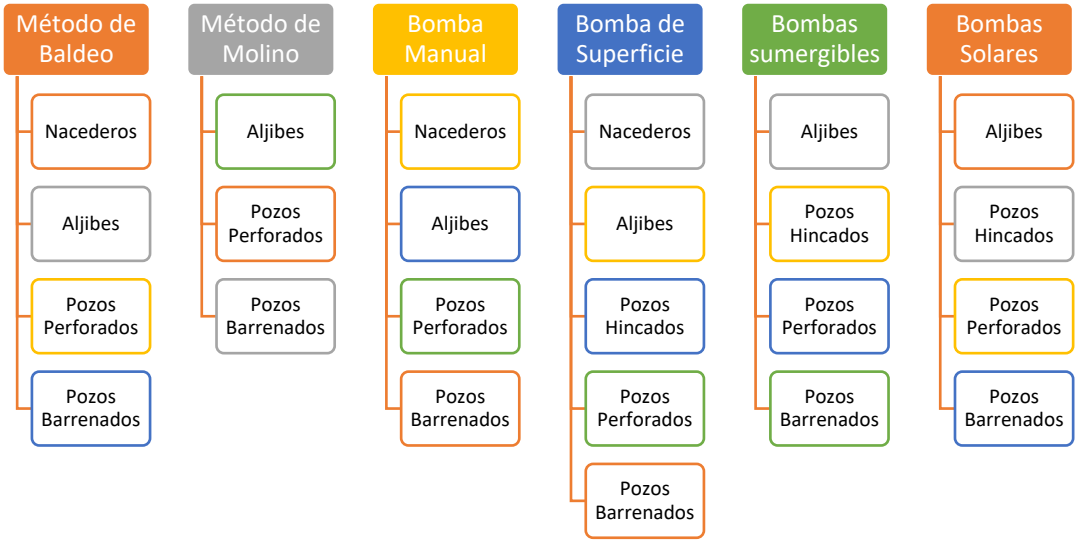
4.3.5.1.1. Sistemas de Extracción en Pozos

Para los pozos perforados se pueden implementar las siguientes metodologías de extracción:



Como resultado de la descripción del apartado métodos de extracción se pueden definir de acuerdo con su tipo de captación, la clasificación que se presenta en la Ilustración 58:

Ilustración 58. Clasificación de acuerdo al tipo de captación



Fuente: Elaboración propia

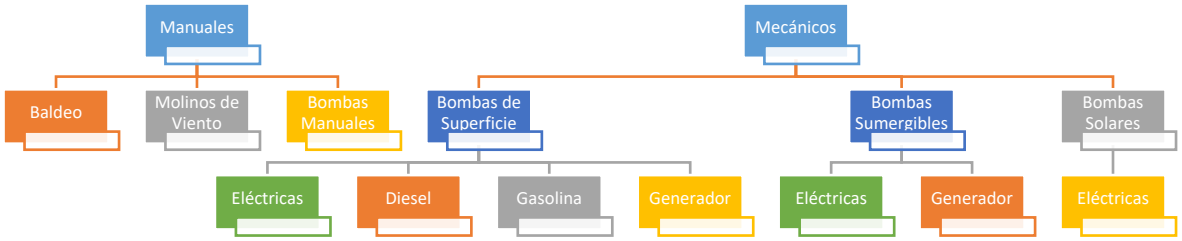
El siguiente paso luego de identificar el tipo de extracción a utilizar es conocer en

que consiste la extracción a utilizar en la captación identificada.

4.4. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

En la obtención de agua subterránea es necesario tomar el agua desde el acuífero hasta el lugar de almacenamiento, con lo cual se han desarrollado diferentes tecnologías para el transporte de agua desde la captación hasta el tanque de almacenamiento. En la Ilustración 59, se presenta una clasificación de los métodos de extracción:

Ilustración 59. Clasificación de los métodos de extracción de agua subterránea



Fuente: Elaboración propia

Aunque las bombas solares son similares en funcionamiento con las bombas sumergibles, se clasifican de forma independiente debido a que su fuente de alimentación no requiere un pago constante de energía para su funcionamiento, A continuación, se describen los métodos más comunes de las formas y equipos de extracción agua subterránea.

4.4.1. BALDEO

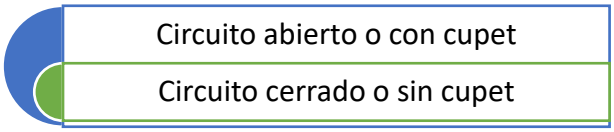
El método de extracción por baldeo es el método más antiguo, ya que no se requiere ningún equipo para extraer el agua, básicamente consiste en la extracción del agua en forma directa del acuífero, a través de un recipiente, como se observa en la Ilustración 60, este se puede realizar con una cuerda o directamente con el recipiente en las manos dependiendo de la profundidad.

Ilustración 60. Extracción de agua por Baldeo

Fuente: freepik[70]

4.4.2. MOLINOS DE VIENTO

Los molinos de viento son equipos que permiten la elevación del agua aprovechando la energía eólica para convertirla en energía mecánica que activa un pistón para generar el movimiento del fluido, sus principales componentes son el pistón, la camisa y el tubo de aspiración. De acuerdo con la profundidad del agua, los sistemas de extracción empleados son: [71]



[70] FREEPIK, «Vector Premium, [POZO PIEDRA AGUA LIMPIA-ARROJA BALDE AGUA ILUSTRACION PLANA] pozo de piedra con agua limpia arroja un balde de agua,» [En línea]. Available: https:// https://www.freepik.es/vector-premium/pozo-piedra-agua-limpia-arroja-balde-agua-ilustracion-plana_13717080.htm.

[71] UNIDAD DEL PATRIMONIO HISTÓRICO INDUSTRIAL. Molins_extr_a_Es - MOLINOS DE VIENTO DE EXTRACCIÓN DE AGUA. 12 págs. Mallorca., España, Unidad del Patrimonio histórico industrial.

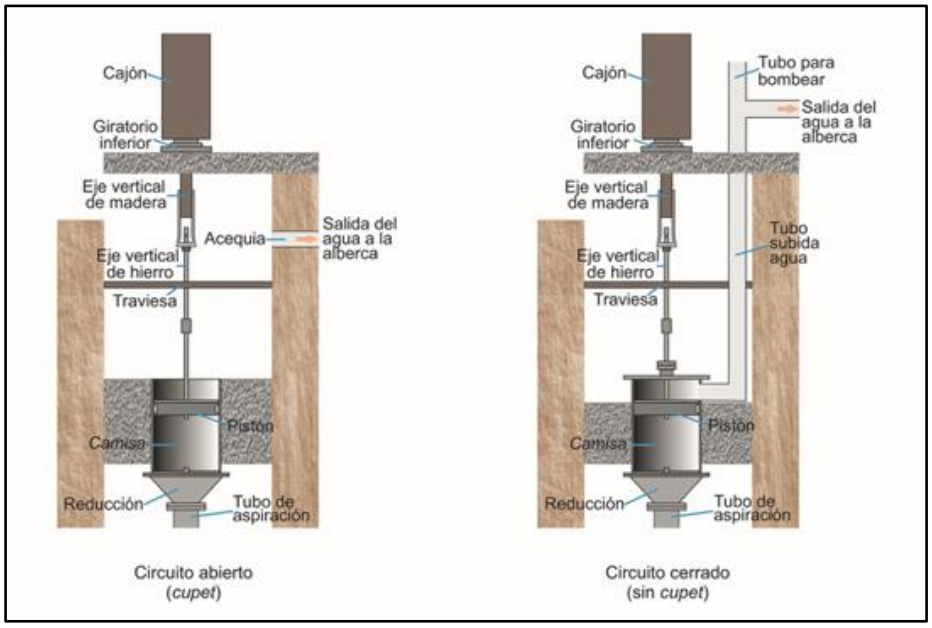
4.4.2.1.1. Circuito abierto (cupet).

“El agua sube directamente al cupet desde el vaso cilíndrico (camisa) donde hay un pistón que bombea y desemboca por un canal (descubierto o cubierto) hacia la alberca.”[72]

4.4.2.1.2. Circuito cerrado (sin cupet)

“El agua sube a través de un tubo conectado al vaso cilíndrico (camisa) donde está el pistón que bombea y desemboca directamente en la alberca” [73]. En la Ilustración 61 se puede observar los sistemas de extracción de molinos.

Ilustración 61. Sistemas de Extracción en los Molinos



Fuente: Unidad de Patrimonio histórico Industrial, Mallorca España.

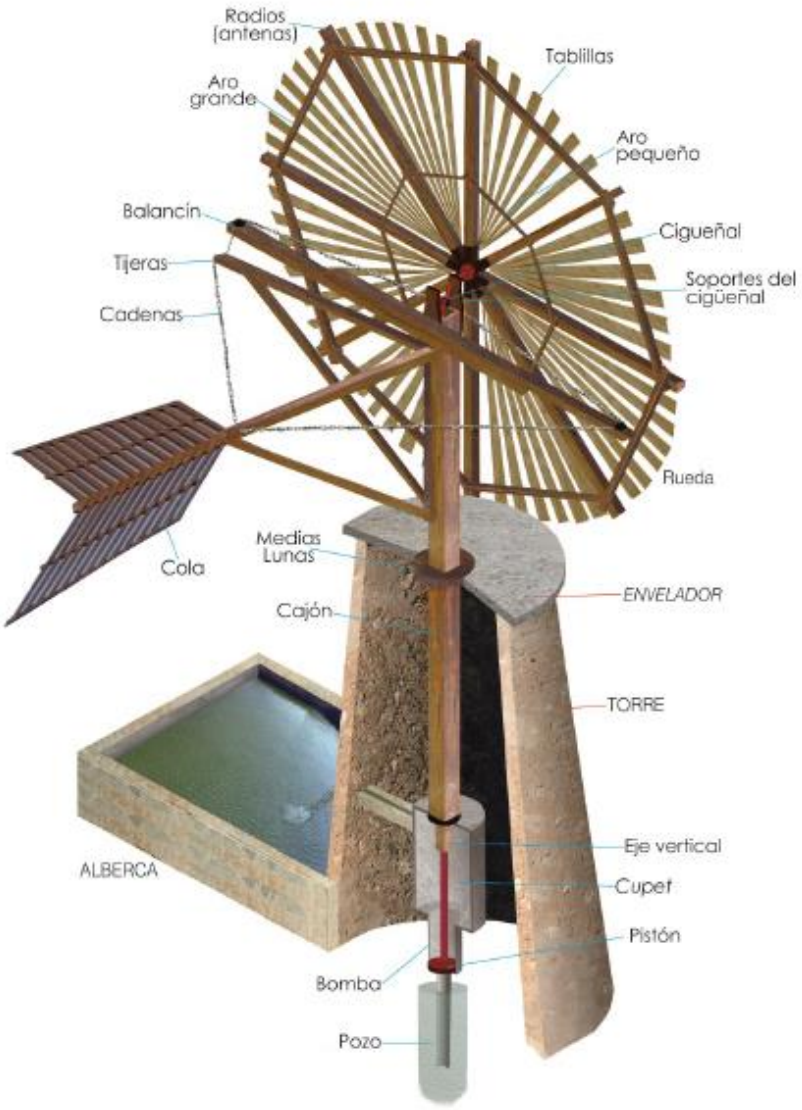
Existen diferentes tipos de Molinos de viento, los más comunes son los de Ramell y de Palas, para estos molinos se pueden llegar a agrupar las piezas en cinco apartados que son:

1. Aparato receptor del impulso del viento
2. Aparato que regula la orientación
3. Aparato estructural del soporte
4. Aparato transmisor del movimiento rotativo o traslativo
5. Aparato hidráulico[74]

[72] UNIDAD DEL PATRIMONIO HISTÓRICO INDUSTRIAL. Molins_extr_a_Es - MOLINOS DE VIENTO DE EXTRACCIÓN DE AGUA. 12 págs. Mallorca., España, Unidad del Patrimonio histórico industrial.
[73] Ibíd.
[74] SBERT, Joan. «Els molins de vent mallorquins». En VALERO MARTÍ, Gaspar (ed.) Elements de la societat

En la Ilustración 62 se puede observar un molino de viento de extracción de agua Ramell.

Ilustración 62. Molino de Viento de Extracción de Agua Ramell

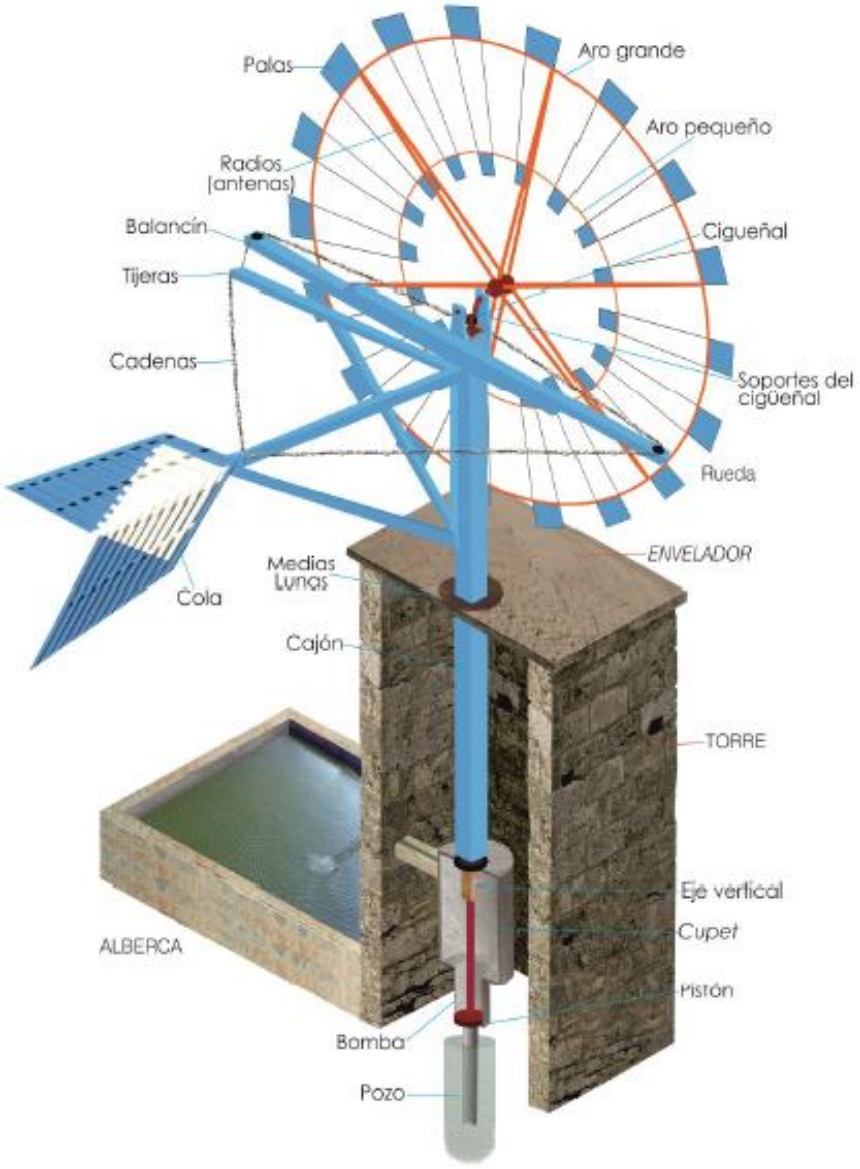


Fuente: Unidad de Patrimonio histórico Industrial, Mallorca España.

En la Ilustración 63 se puede observar un molino de viento de extracción de agua palas.

pre-turística mallorquina. Palma: Conselleria de Cultura, Educació i Esports, 1989 (p. 91-108).

Ilustración 63. Molino de viento de extracción de agua palas



Fuente: Unidad de Patrimonio histórico Industrial, Mallorca España.

Los molinos de viento tienen alto costo de instalación, lo cual se ha compensado con su bajo costo de operación, limitado solo a su mantenimiento, al igual que las bombas solares no consumen energía eléctrica, por lo cual no se requiere realizar pagos de facturas mensuales.[75]

[75] M. d. A. Subterránea, «URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA. Manual de Agua Subterránea (Montevideo, 2012). COLLAZO CARABALLO, María Paula y MONTAÑO XAVIER, Jorge.,» [En línea].

Los molinos de viento pueden elevar caudales pequeños, con un rango entre 500 a 1000 l/día, y desde profundidades someras. Su principal inconveniente debido a que funciona con energía eólica requiere la presencia de viento para su funcionamiento, por lo que son más útiles en las zonas que presentan esta característica climática, los cuales deben ser ubicados en áreas relativamente altas y despejadas (sin cortinas de árboles ni obstáculos para el pasaje de aire). [76]

4.4.3. BOMBAS MANUALES

Las bombas manuales son bombas hidráulicas que utilizan el esfuerzo muscular de una persona para su impulsión, básicamente son un tipo de dispositivo en el que su funcionamiento principal es suministrar agua en lugares donde el acceso a fuentes de energía y recursos económicos son limitados y en los cuales no se requiere un volumen excesivo.[77]

Normalmente, este tipo de bombas se utilizan para extraer pequeñas cantidades de agua de fuentes de agua superficiales y depósitos subterráneos, en las cuales se puede llegar hasta profundidades de 80 m como máximo, o bien para bombear agua a sistemas de distribución o sistemas de riego. Una de sus características principales es que estas bombas proporcionan suministro de agua potable de acceso rápido, fácil y más seguro si se realiza una comparación con otros dispositivos de elevación con cuerda y balde (Baldeo).[78]

Cuenta con una ventaja importante, ya que la instalación y operación son sencillas, por lo que las bombas manuales son una de las tecnologías de levantamiento de agua más frecuentes para las áreas rurales, especialmente en países en desarrollo. Debido a su fácil funcionamiento permiten a mujeres y niños puedan realizar la actividad con autonomía. La mayor bondad del bombeo manual es que presenta el potencial de mejorar el sistema local de gestión del agua de una comunidad y su sustento de manera significativa.[79]

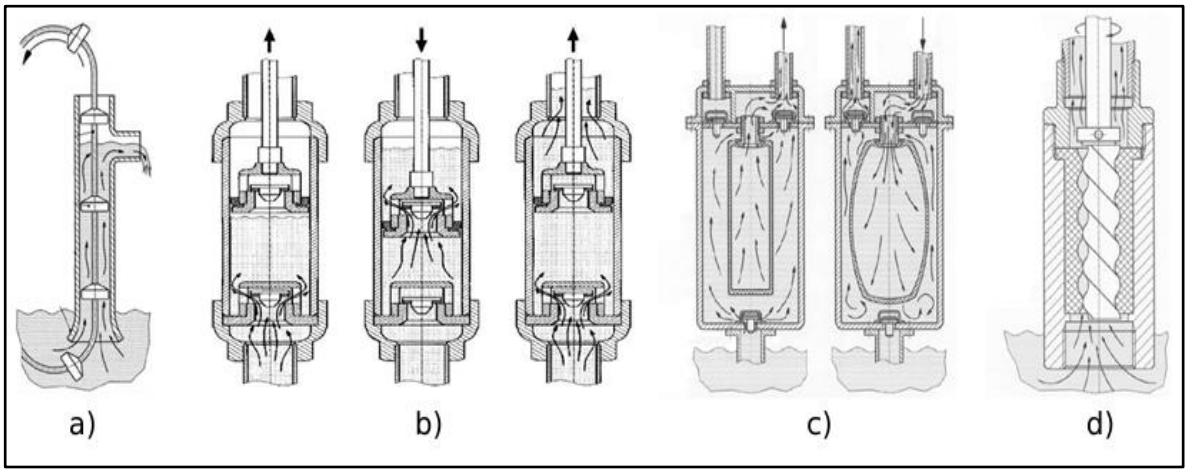
4.4.3.1.1. Clasificación de las Bombas Manuales

Dentro de las bombas manuales se han desarrollado a lo largo de los años una gran variedad de diseños que se encuentran en mejoras continuas. Normalmente una clasificación sencilla se puede definir de acuerdo con el mecanismo de bombeo usado, los cuales serían bombas de pistón o algunas alternativas y las bombas de

[76] M. d. A. Subterránea, «URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA. Manual de Agua Subterránea (Montevideo, 2012). COLLAZO CARABALLO, María Paula y MONTAÑO XAVIER, Jorge.,» [En línea].
[77] SSWM.INFO, «es, gass perspective es, tecnologias de, tecnologias de abastecimiento de agua, distribucion, [BOMBEO DE AGUA MANUAL] Introducción» [En línea]. Available: https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/distribucion/bombeo-de-agua-manual.
[78] Ibíd.
[79] Ibíd.

arrastre o comúnmente conocidas como gravimétricas, al igual que las anteriores, pero en menor medida las bombas de diafragma o de cavidad progresiva.[80] Estas clases de bombas se pueden ver en la Ilustración 64 a continuación:

Ilustración 64. Mecanismos de Bombeo a) Arrastre, b) Pistón, c) Diafragma, d) Cavidad Progresiva



Fuente: Universidad Carlos II de Madrid, España.

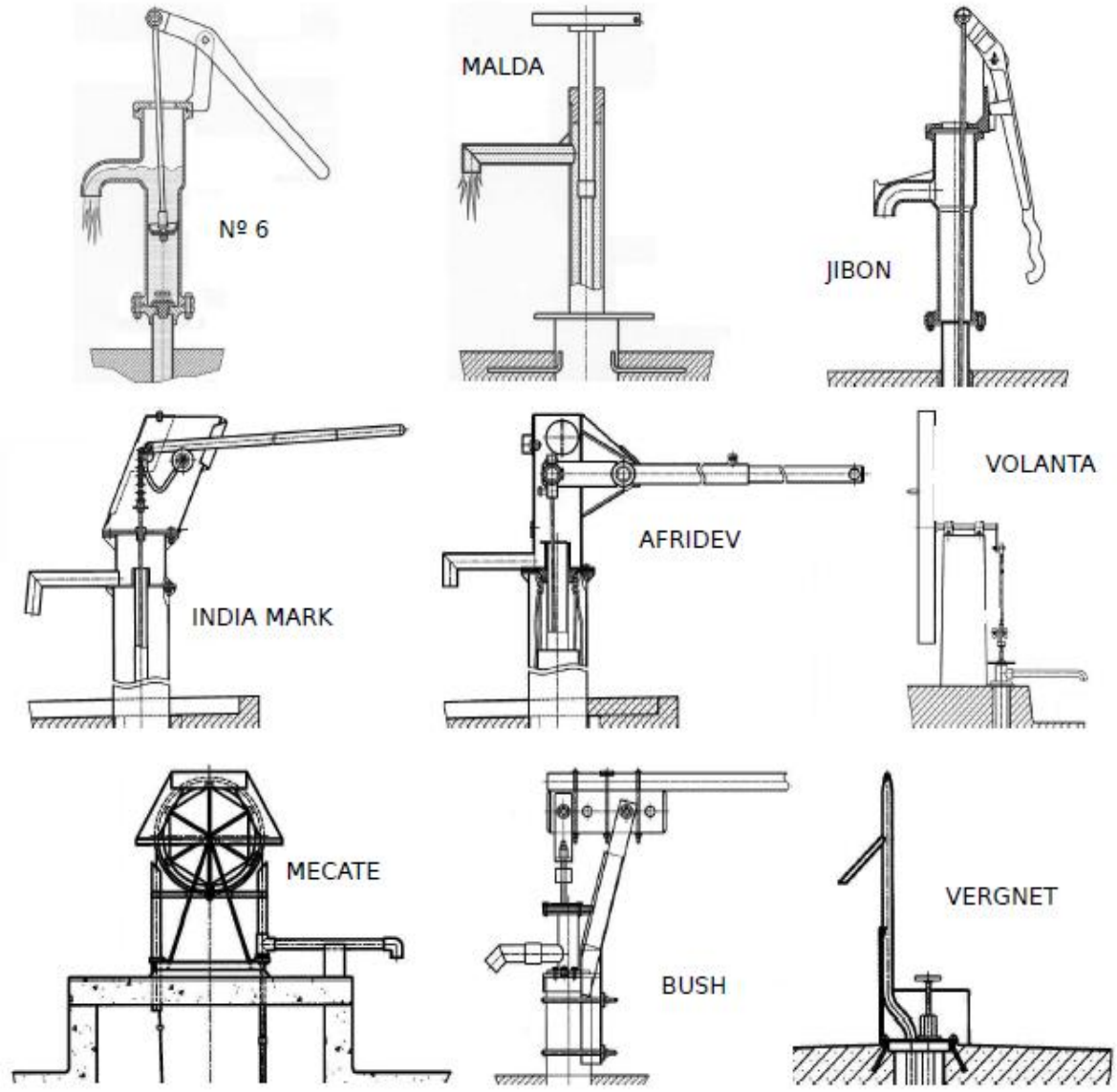
Dentro del grupo de bombas de pistón, las más habituales se pueden dividir en bombas de succión (No. 6), bombas de acción directa (Malda, Tara, el modelo comercial Nira), en cuanto a las bombas de palanca para pozo profundo se tiene (India, Mark, U3M, Afridev, Bush, etc.).

> *"Las bombas de arrastre utilizan el movimiento de una cuerda (mecate) con una serie de pistones equiespaciados. Las bombas de diafragma (Vergnet, etc.) o de cavidad progresiva trabajan en rangos intermedios entre las de acción directa y de palanca, aunque estos mecanismos suelen ser utilizados más comúnmente en bombas motorizadas. A parte de las bombas de dominio público, merece la pena mencionar otros diseños como la Treadle (bomba accionada con el pie, con diversas variantes), la Rower (bomba de succión con accionamiento inclinado para trabajar sentado) o la Bluepump (bomba de palanca para grandes profundidades)* ".[81]

La Ilustración 65 presenta los diferentes tipos de bombas manuales.

[80] UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Grupo de Tecnologías Apropiadas, Bombas Manuales. 2015. Legánes, España, 2015.1 pags.
[81] Ibíd.

Ilustración 65. Tipos de Bombas Manuales



Fuente: Universidad Carlos II de Madrid, España.

La Tabla 30 presenta los diferentes rangos de trabajo, así como los rendimientos de algunas bombas de dominio público para la extracción de agua con bombas manuales.

Tabla 30. Rangos de Trabajo y Rendimiento de Bombas Manuales

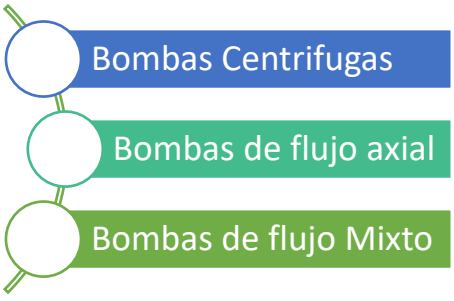
m	No 6	Jibon	Malda Nira Tara	Mecate	Vergnet	U3M	Afridev	Bush	India Markt II/III	Volanta
5	82%	54%	64%							
10		65%	65%	51%	36%	44%	51%	51%	65%	
15		65%	65%	60%	49%	54%	60%	60%	71%	
20					54%	58%	65%		73%	76%
25								73%	82%	
30				76%	71%	65%	76%	76%	87%	
40										73%
60										54%
80										44%

Fuente: Universidad Carlos II de Madrid, España.[82]

4.4.4. BOMBAS DE SUPERFICIE

Las bombas de superficie realizan la función de elevar caudales variables en función de la potencia de la bomba, pero en general se usan para profundidades someras, por lo que generalmente se utilizan en perforaciones con brocas. Este tipo de bombas presenta una ventaja frente a las bombas sumergibles, ya que tienen en general menor costo.[83]

Este tipo de bombas funcionan en su gran mayoría con energía eléctrica o generador, aunque se pueden conseguir en algunas marcas bombas de superficie con moteres de combustión a gasolina o Diesel. Estas dos últimas fuentes de energías combustibles se usan en lugares remotos donde no se cuenta con energía eléctrica. A continuación, se realizará una clasificación de las bombas de acuerdo con sus rotores:



[82] UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Grupo de Tecnologías Apropiadas, Bombas Manuales. 2015. Legánes, España, 2015.1 pags.
[83] M. d. A. Subterránea, «URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA. Manual de Agua Subterránea (Montevideo, 2012). COLLAZO CARABALLO, María Paula y MONTAÑO XAVIER, Jorge.,» [En línea].

4.4.4.1.1. Bombas Centrifugas

Este tipo de bombas se caracteriza por su flujo radial en el cual el fluido ingresa a la bomba de forma axial, pero que su salida será impulsada con una dirección radial, es decir, el movimiento del agua sigue una trayectoria que se encuentra de forma perpendicular al eje del impulsor. A continuación, en la Ilustración 66 se presenta una bomba centrífuga.[84]

Ilustración 66. Bomba Centrifuga

Fuente: Ignacio Gómez

Este tipo de bombas son las más usuales en sistemas de bombeos de pozos.

4.4.4.1.2. Bombas de Flujo Axial

Las bombas de flujo axial se caracterizan porque tanto el ingreso como la salida de agua se realiza en sentido axial, normalmente en bombas con bajas alturas de elevación, pero con gran capacidad de caudal. Este tipo de bombas no es muy usual en aguas subterráneas, aunque se pueden utilizar cuando se requiere realizar la extracción en menor tiempo. En la Ilustración 67 se presenta una bomba axial.[85]

[84] SALDARRIAGA. Juan. Hidráulica de Tuberías Abastecimiento de agua, Redes, Riegos. Cuarta Impresión. Bogotá, 2015.662p.
[85] Ibíd.

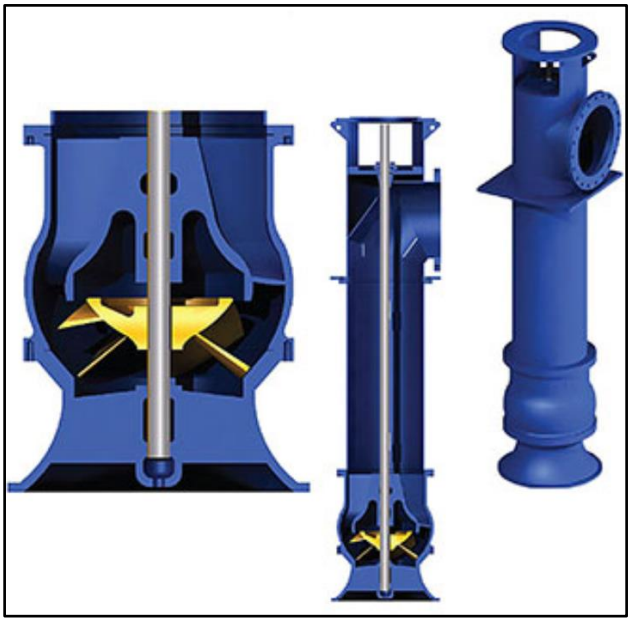
Ilustración 67. Bomba Axial

Fuente: HCP Pumps

4.4.4.1.3. Bombas de Flujo Mixto

Las bombas de flujo mixto se caracterizan porque el ingreso del fluido se realiza de forma axial y que presenta una salida con componentes en dirección axial y radial. En la Ilustración 68 se puede observar una bomba de flujo mixto.

Ilustración 68. Bomba de Flujo Mixto



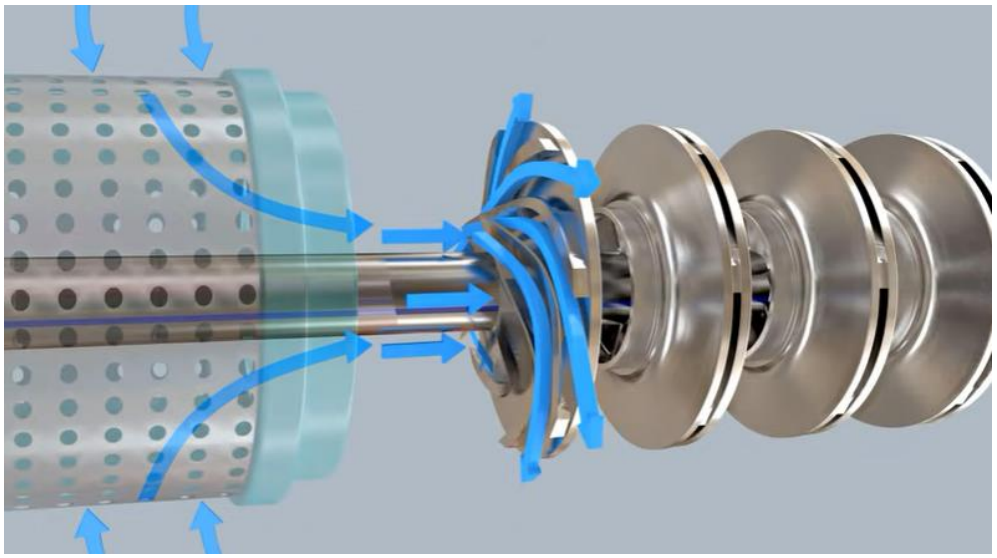
Fuente: dirind

Finalmente, las bombas superficiales se pueden resumir de acuerdo con su potencia de entrada y eficiencia, ya que las bombas centrífugas presentan una presión relativamente alta, pero con un caudal bajo, mientras que las bombas de flujo axial presentan bajas presiones, pero caudales altos, en cuanto a las bombas mixtas tienen características que permiten tener un intermedio entre presión y caudal.

4.4.5. BOMBAS SUMERGIBLES

Las bombas sumergibles son equipos mecánicos de tipo centrífugo con aspas de tipo curvadas hacia atrás en el cual los impulsores realizan la expulsión del agua hacia afuera, los impulsores se conectan a un eje el cual está activado por un motor de inducción, el agua ingresa por los ojos del impulsor y luego se impulsan de forma radial debido a la fuerza centrífuga. En la Ilustración 69 se puede observar la impulsión del agua en una bomba sumergible. [86]

Ilustración 69. Impulsión de agua en bomba sumergible



Fuente: ksb pumps

Debido a la acción centrífuga las partículas de agua ganan energía cinética y de presión, a través de un dispositivo llamado difusor se realiza la conexión entre los diferentes impulsores que se encuentran conectados al eje, entre mayor sea la cantidad de impulsores en la bomba, mayor será la altura a la cual se podrá elevar el agua. A continuación, en la Ilustración 70 se presenta una bomba sumergible.[87]

[86] KBS, «en-de, applications, water technology, [WATER EXTRACTION] Water Extracion,» [En línea]. Available: https://www.ksb.com/en-de/applications/water-technology/water-extraction.
[87] KBS, «en-de, applications, water technology, [WATER EXTRACTION] Water Extracion,» [En línea]. Available: https://www.ksb.com/en-de/applications/water-technology/water-extraction.

Ilustración 70. Bomba Sumergible

Fuente: ksb pumps

Finalmente, de acuerdo con lo descrito anteriormente, las bombas sumergibles son equipos electromecánicos que elevan caudales variables en un pozo profundo, los cuales pueden cambiar en función de la potencia de la bomba, desde cualquier profundidad. Su funcionamiento se realiza con energía eléctrica o un generador. En la Ilustración 71 e Ilustración 72 se presenta una bomba sumergible al interior de un pozo. [88]

[88] M. d. A. Subterránea, «URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA. Manual de Agua Subterránea (Montevideo, 2012). COLLAZO CARABALLO, María Paula y MONTAÑO XAVIER, Jorge.,» [En línea].

Ilustración 71. Bomba sumergible en Pozo

Fuente: ksb pumps

Ilustración 72. Extracción de agua subterránea con bomba sumergible

Fuente: ksb pumps

4.4.6. BOMBAS SOLARES

Las bombas solares son equipos mecánicos que funcionan con motores eléctricos alimentados a través de energía solar, este tipo de bombas se convierten en una gran alternativa para el transporte de agua en zonas remotas donde no hay posibilidad de conexión con energía eléctrica, con lo cual en su funcionamiento son muy económicas, ya que no se requiere pago de facturas y son amigables con el ambiente. Un posible problema es que puede disminuir su rendimiento en días nubados o con lluvia. En la Ilustración 73 se presenta una bomba solar.

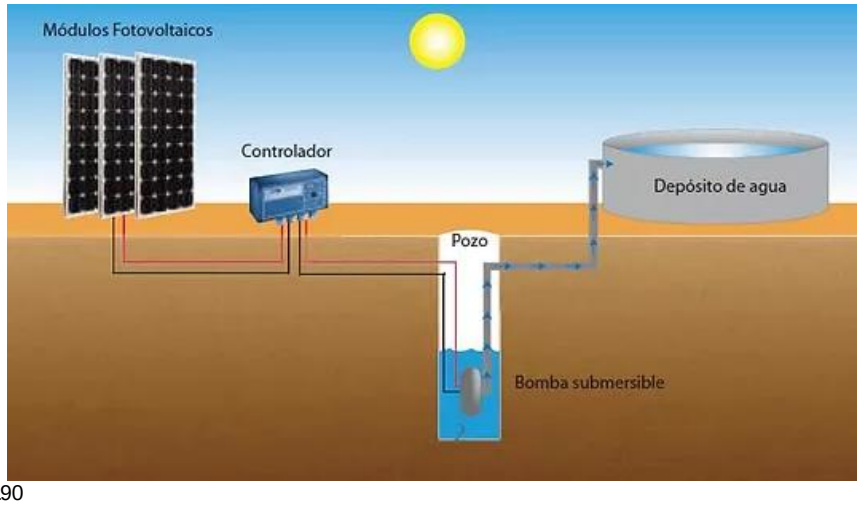
Ilustración 73. Bomba Solar

Fuente: Feli pumps co

Las bombas solares pueden transportar caudales pequeños, con valores entre 500 a 1000 l/día (depende del fabricante, estos valores pueden variar), desde profundidades variables en función del tipo de bomba.[89] Los costos de instalación pueden ser altos, pero son compensados con el costo de operación. Pueden funcionar únicamente en el día en el cual el coste de instalación es menor, si se requiere operación de la bomba en la noche se deben instalar baterías para el almacenamiento de energía, lo cual incrementa el valor de la instalación. En la Ilustración 74 se presenta una bomba solar en un pozo.

[89] M. d. A. Subterránea, «URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA. Manual de Agua Subterránea (Montevideo, 2012). COLLAZO CARABALLO, María Paula y MONTAÑO XAVIER, Jorge.,» [En línea].

Ilustración 74. Bomba Solar en Pozo



Fuente: Mexwatt[90]

4.5. CONSTRUCCIÓN DE UN POZO

En este apartado se realiza una descripción de la metodología más usual para la construcción de pozos.

4.5.1. ALJIBE

La construcción de un aljibe consiste en realizar una excavación manual en el punto de captación identificado para la extracción de agua subterránea, la profundidad se realizará hasta que se encuentre la tabla de agua, profundizando el pozo considerando posibles descensos del nivel del acuífero en temporadas de verano. En la Ilustración 75 se presenta la excavación de un aljibe.

Ilustración 75. Excavación de Aljibe

Fuente: Instituto nacional de Tecnología agropecuaria, Argentina. 2015

[90] MEXWATT, «bombas Solares, [BOMBAS SOLARES] Bombas solares para pozos y cisternas,» [En línea]. Available: https://www.mexwatt.com/bombas-solares.

Posteriormente, se procede a realizar la instalación de mampostería hasta que se encuentre bajo 5 metros de la superficie del terreno, en ese punto se procederá a realizar el encofrado que permitirá la instalación de concreto. Este concreto sirve de protección del acuífero ante posibles contaminantes que se encuentren cerca de la captación. En la Ilustración 76 e Ilustración 77 se presenta la etapa de construcción de mampostería y concreto.

Ilustración 76. Construcción de Aljibe, Etapa de Mampostería

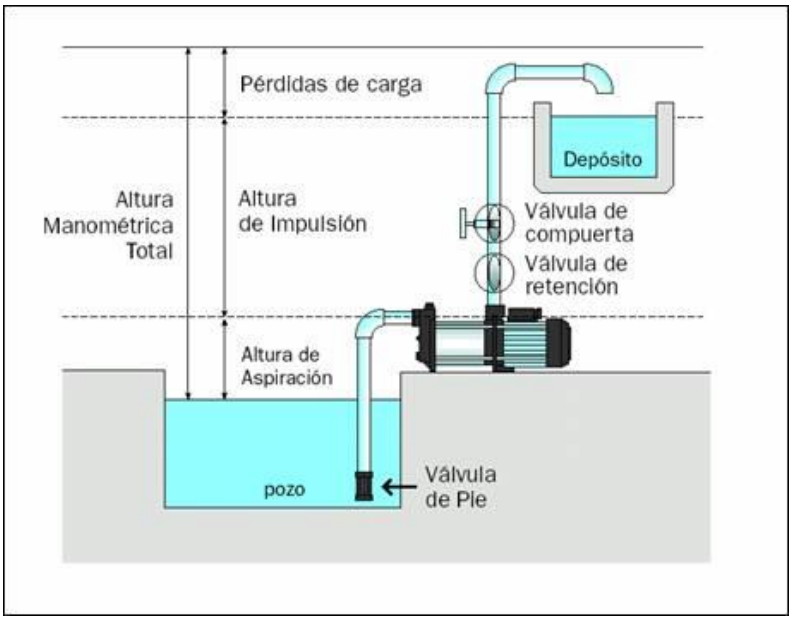
Fuente: Carlos Pardo, Construcción de un Aljibe, España

Ilustración 77. Construcción de Aljibe, Etapa de Concreto

Fuente: Impermeabilizaciones Miguel, Santa Cruz de Tenerife, España

La etapa final consiste en la instalación de las tuberías y los equipos de bombeo, esto varía de acuerdo al sistema de extracción seleccionado para la captación. En la Ilustración 78Ilustración 78 se presenta una instalación típica de una bomba de superficie.

Ilustración 78. Bomba de Superficie en Pozo

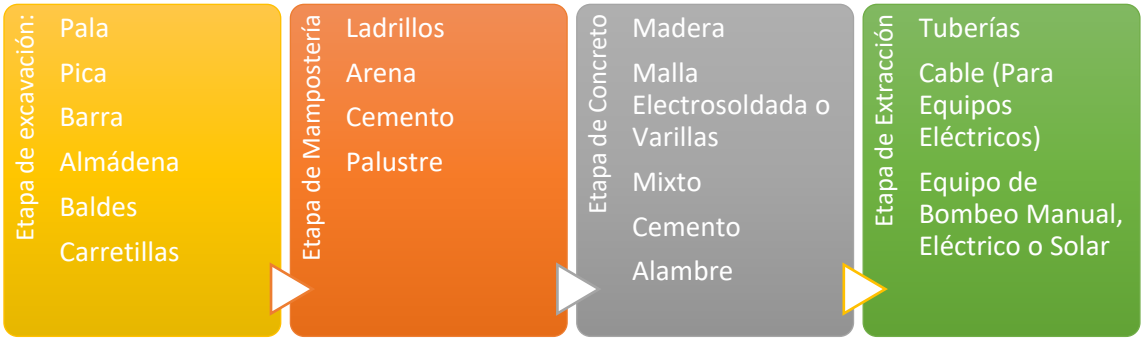


Fuente: Aconstructoras, Tubomaquinas, Motobombas

4.5.1.1.1. Materiales Para la construcción de un Aljibe

A continuación, en la Ilustración 79, se presentan los materiales y herramientas más frecuentes a utilizar en la construcción de un aljibe.

Ilustración 79. Materiales y herramientas más frecuentes en la construcción de un aljibe



Fuente: Elaboración propia

4.5.2. CONSTRUCCIÓN DE POZO CON MÁQUINA

La construcción de pozos con máquina requiere que en el proceso de construcción se definan una serie de etapas previas y posteriores a la perforación del pozo. A continuación, se presenta las etapas generales para la construcción de un pozo.

4.5.2.1.1. Etapa previa

De acuerdo con los pasos previos de la guía, se ha seleccionado el lugar donde se realiza la perforación, el cual debe estar alejado de las posibles fuentes de contaminación de las aguas subterráneas.

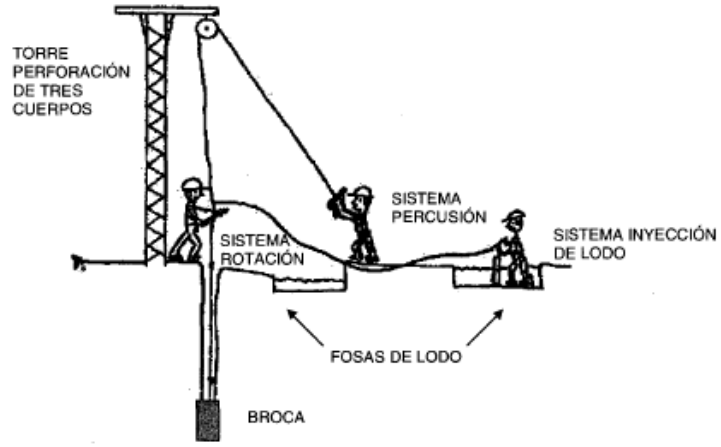
Posteriormente, se realiza el montaje de los equipos de perforación con todas las especificaciones técnicas (Torre de perforación, barras o tubería de perforación, broca, bomba de lodo y bomba de agua).[91]

4.5.2.1.2. Etapa de perforación

En esta etapa ya se cuenta con los equipos de perforación montados, se procede a su instalación en el sitio seleccionado y se da inicio a la perforación del pozo aplicando la tecnología de perforación más conveniente para el tipo de captación y el tipo de suelo de la zona.

En cuento a la instalación del equipo de perforación, abarca principalmente el anclaje de la torre de perforación, la instalación de la manija o agarrador en forma de "T", junto con los tubos de perforación y la broca, se realiza la excavación de las fosas de lodo, instalación de la bomba de lodo y de la manguera de inyección. En la Ilustración 80 se observa la instalación del equipo de perforación.

Ilustración 80. Sistema de Perforación de Pozos



Fuente: Perforación de Pozos Profundos, Ministerio de Ambiente

[91] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Perforación De Pozos Profundos De Pequeño Diámetro. 2003. Bogotá, D. C. 55 pags.

Finalmente, en esta etapa se realiza perforación en sí, que básicamente consiste en un proceso que puede ser de rotación o de percusión de acuerdo con el tipo de perforación seleccionada para el pozo.

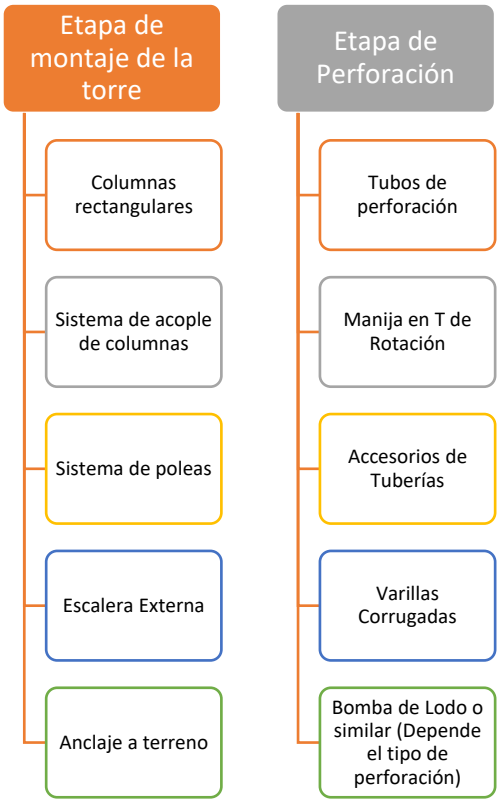
4.5.2.1.3. Etapa posterior a la perforación

Cuando se ha finalizado la perforación se debe realizar la limpieza del pozo, el entubado del pozo, la instalación del sello sanitario, la instalación de la bomba de agua y del cabezal. [92]

4.5.2.1.4. Materiales para la construcción del pozo

La Ilustración 81 a continuación, menciona los materiales que se recomiendan tener en cuenta en la construcción de un pozo

Ilustración 81. Materiales para la construcción de un pozo



Fuente: Elaboración propia

Para profundizar con mayor detalle respecto a la perforación de pozos se puede realizar la consulta en el documento “Perforación De Pozos Profundos De Pequeño Diámetro” del Ministerio de Vivienda.

[92] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Perforación De Pozos Profundos De Pequeño Diámetro. 2003. Bogotá, D. C. 55 pags.

4.6. REJILLA PARA POZO PROFUNDO

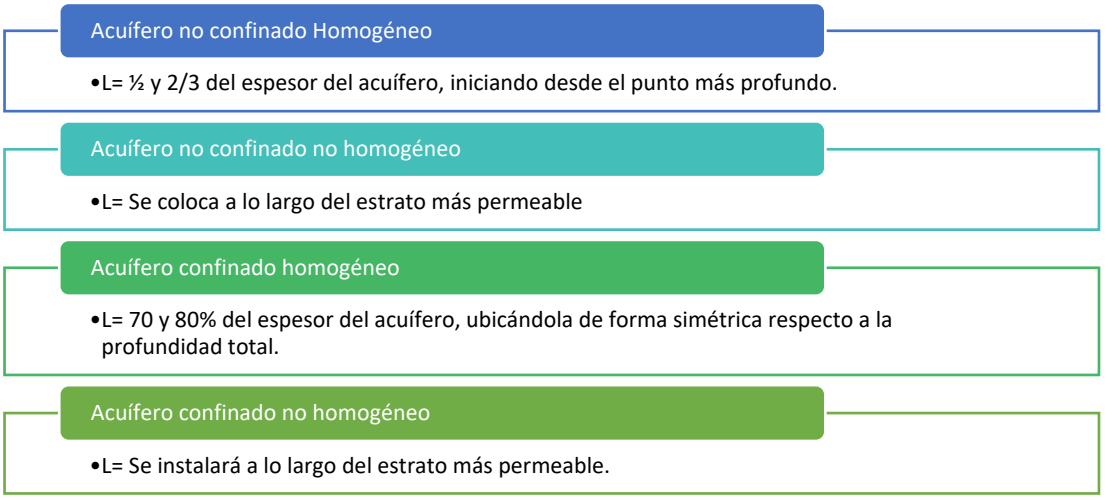
Una parte fundamental en el funcionamiento de los pozos profundos son las rejillas, las cuales son un elemento en el cual el agua del acuífero es succionada al pozo, y su longitud dependerá del tipo de acuífero que se va a explotar[93]. En la Ilustración 82 se presenta una imagen de una rejilla para pozo profundo.

Ilustración 82. Rejilla Para Pozo Profundo

Fuente: Tomado de Portal Web Tuvanosa. México.

Para definir la longitud de las rejillas se puede realizar una clasificación de acuerdo a si es un acuífero confinado o no, y si es homogéneo o no. A continuación, se presenta la clasificación de la longitud de rejillas para pozos profundos.

Ilustración 83. Clasificación de la longitud de rejillas para pozos profundos



Fuente: Elaboración propia

[93] LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.

Sin embargo, la longitud mínima de la rejilla puede ser calculada como lo expresa la Ecuación 21:

$$L = \frac{0.0054 \times Q_e}{A_e \times V_e}$$

Ecuación 21. Cálculo de Longitud Mínima de Rejilla Para Pozo Profundo
Fuente: López Cualla[94]

Donde,
Q_e: Caudal de diseño (m^3/s)
A_e: Área efectiva de rejilla por metro de rejilla (m^2/m) (este valor depende de la granulometría del acuífero.
Ve: Velocidad de entrada de la rejilla, varía entre 0.03m/s y 0.045 m/s.

Para definir del diámetro de la rejilla se debe determinar con base en el caudal y velocidad de flujo, sin embargo, el diámetro mínimo de la rejilla será de 150 mm y no debe ser superior al diámetro de la camisa de revestimiento del pozo. [95]

4.7. PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Las propiedades hidráulicas me permiten identificar como será el comportamiento del agua a través de los diferentes intersticios presentes en el suelo, me indican la velocidad con que el agua recorre el suelo. A continuación, se describen las propiedades y tipos de pruebas a desarrollar.

4.7.1. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD

4.7.1.1.1. Conductividad Hidráulica (K)

Es la capacidad de un medio poroso para transmitir agua, esta depende de las características del medio, de la masa específica y viscosidad del agua, y corresponde a la constante de proporcionalidad de la Ley de Darcy.96

De acuerdo con el autor Hurtado, W “las mezclas de arena y arcilla son uno de los suelos más comunes en el diseño de algunas estructuras geotécnicas, ya sea en un entorno de suelo natural o como material de relleno, en ambos casos la estimación de la conductividad hidráulica permite cuantificar los caudales de infiltración, fuerzas de infiltración, duración de la consolidación, entre otros”[97].

[94] LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.
[95] Ibíd.
[96] MINISTERIO DEL MEDIO MABIENTE, Guía Para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA. Chile, 2012. P. 63.
[97] HURTADO, W. M, influencia de la distribución espacial del contenido de finos en la conductividad hidráulica de mezclas areno-arcillosas. Bogotá, 2020. P. 2.

La literatura muestra que, para mezclas saturadas de arena y arcilla, la conductividad depende de las proporciones relativas entre los dos materiales, la densidad o porosidad general, la mineralogía o tipo de material y la interconexión entre poros. A continuación, se presenta la Tabla 31 que realiza una clasificación de las unidades hidrogeológicas de acuerdo con su conductividad hidráulica.

Tabla 31. Clasificación de unidades hidrogeológicas según su conductividad hidráulica

Conductividad Hidráulica (m/día)	$<10^{-6} – 10^{-4}$	$10^{-4} – 10^{-2}$	$10^{-2} – 1$	$1 – 10^{2}$	10^{2} - $>10^{4}$
Clasificación	Impermeables	Poco Permeables	Algo Permeable	Permeable	Muy Permeable
Calificación del Acuífero	Sin Acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de Materiales	Arcilla Compacta, pizarra, granito	Limo arenoso, limo, arcilla limosa	Arena Fina, arena limosa, caliza poco fracturada, basaltos	Arena limpia, grava y arena, arena fina, caliza fracturada	Grava limpia, dolomitas, calizas muy fracturadas

Fuente: Custodio & Llamas, 1983

Otra fuente para determinar la conductividad hidráulica o permeabilidad, pero teniendo en cuenta su capacidad de drenaje se indica en la Tabla 32.

Tabla 32 Clasificación de terrenos por la Permeabilidad.

Permeabilidad (m/día)	10^{-6} 10^{-5} 10^{-4}	10^{-3}	10^{-2} 10^{-1} 1 10 10^{2}	10^{3} 10^{4}
Tipo de terreno	Grava limpia	Arena limpia; mezcla de grava y arena	Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas	Arcillas no meteorizadas
Calificación	Buenos acuíferos	Acuíferos pobres		Impermeables
Capacidad de drenaje	Drenan bien	Drenan mal		No drenan

Fuente: Las aguas subterráneas, un enfoque práctico. INGEOMINAS

4.7.1.1.2. Coeficiente de Almacenamiento (S)

Parámetro que indica el agua que podemos obtener de acuíferos confinados y semiconfinados, y se calcula como se indica en la Ecuación 22.

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado}}{\text{Volumen total que ha bajado la superficie piezométrica}}$$

Ecuación 22. Coeficiente de Almacenamiento

Es adimensional. Se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión). Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura la del espesor saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico. Toma valores diferentes según sea el acuífero libre o cautivo. En un acuífero libre, el valor del coeficiente de almacenamiento coincide con el valor de porosidad eficaz.

En un acuífero cautivo, sin embargo, este volumen de agua que causa un descenso de una unidad en el nivel piezométrico coincide con la suma del agua a descomprimirse y el agua que cede el terreno al compactarse el armazón por tener que soportar en mayor parte el peso del terreno suprayacente.

En un acuífero libre: S=0'05 – 0'03
En acuíferos confinados: S= 10-3 – 10-5.[98]

En la Tabla 33 se realiza una clasificación de unidades hidrogeológicas de acuerdo al coeficiente de almacenamiento.

Tabla 33 Clasificación de unidades hidrogeológicas según coeficiente de almacenamiento

Valores Del Coeficiente de Almacenamiento (S)		
Tipo de Material Permeable	**Comportamiento del Acuífero**	**Valores de S (Medio)**
Kárstico		
Calizas y dolomitas Jurásicas	Libre	$2x10^{-2}$
	Semiconfinado	$5x10^{-4}$
	Confinado	$5x10^{-5}$
Calizas y dolomitas Cretácicas y Terciarias	Libre	$2x10^{-2}$ - $6x10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3} - $5x10^{-4}$
	Confinado	10^{-4} - $5x10^{-5}$
Gravas y Arenas	Libre	$5x10^{-2}$ - $15x10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15x10^{-2}$ - $18x10^{-2}$

Fuente: Villanueva e Iglesias, 1984

[98] Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. Lima, Perú.Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física (8° edición). Madrid, España: Pearson Educación.

4.7.1.1.3. Transmisividad (T)

Se conoce como transmisividad a la cantidad estimada de agua que puede ser transmitida horizontalmente en un acuífero confinado de espesor b, bajo un gradiente hidráulico unitario.

Se define en la Ecuación 23 como:

$$T = b \times K$$

Ecuación 23. Transmisividad

Donde,

b: Espesor saturado
K: Conductividad hidráulica

En el escenario que el acuífero tenga presencia de múltiples estratos, la transmisividad total será la suma de las transmisividades de cada estrato. Para un acuífero libre la transmisividad se expresa en función del espesor saturado h como se denota en la Ecuación 24:

$$T = h \times K$$

Ecuación 24. Transmisividad en función del espesor saturado h

La Transmisividad se puede calificar en magnitud como se indica en la Tabla 34.

Tabla 34. Calificación de la magnitud de la transmisividad

T (m2/día)	Calificación Estimada
T < 10	Muy baja
10 < T < 100	Baja
100 < T < 500	Media
500 < T < 1000	Alta
T > 1000	Muy Alta

Fuente: Las Aguas Subterráneas un enfoque práctico[99]

4.7.2. PRUEBAS DE BOMBEO

Es una prueba que permite determinar los parámetros hidráulicos de los acuíferos (conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento) y es imprescindible para conocer el nivel de trabajo y el caudal de explotación del pozo. Estos últimos datos son necesarios para dimensionar la bomba que será instalada

[99] VÉLEZ OTÁLVARO. Maria Victoria. A. Las Aguas Subterráneas Un Enfoque Práctico. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, 2011.117p.

en el pozo.

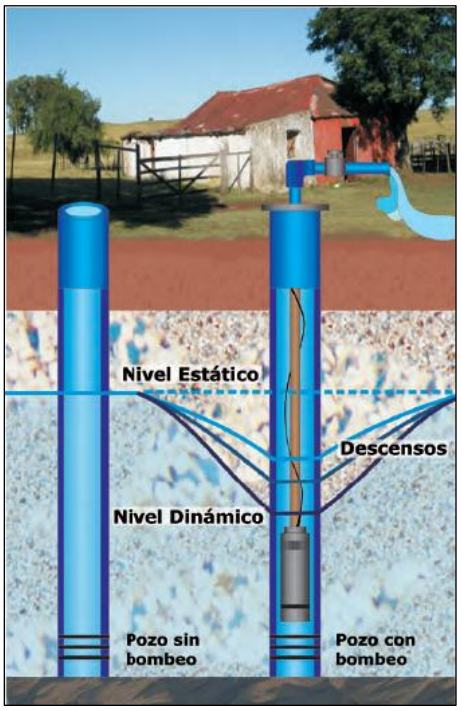
Existen diversos tipos de ensayos de bombeos:

- Caudal constante
- Caudal variable

El ensayo consiste en medir la profundidad del agua en el pozo, luego se enciende la bomba a caudal constante o variable dependiendo la prueba y realiza el registro de mediciones en diferentes tiempos establecidos previamente a la prueba, transcurrido un cierto tiempo el nivel del agua se estabilizará o su cambio será muy poco con lo cual se puede decir que se ha estabilizado el nivel. Al finalizar el bombeo el nivel inicia un ascenso hasta llegar al nivel inicial de la prueba, al igual que en el descenso se debe registrar el tiempo que tarda el nivel en recuperarse al momento del ascenso.

A partir de estos datos, se utilizan ecuaciones analíticas que permiten hacer una estimación de los parámetros hidráulicos del acuífero. En la Ilustración 84Ilustración 84 se presenta una prueba de bombeo.

Ilustración 84. Prueba de Bombeo



Fuente: Tomado de Manual de Agua Subterránea. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay.

4.7.3. ENSAYOS RÁPIDOS

Los ensayos rápidos son una forma como su nombre lo indica realizar de manera práctica y rápida la determinación de las variables de permeabilidad en el suelo, ya

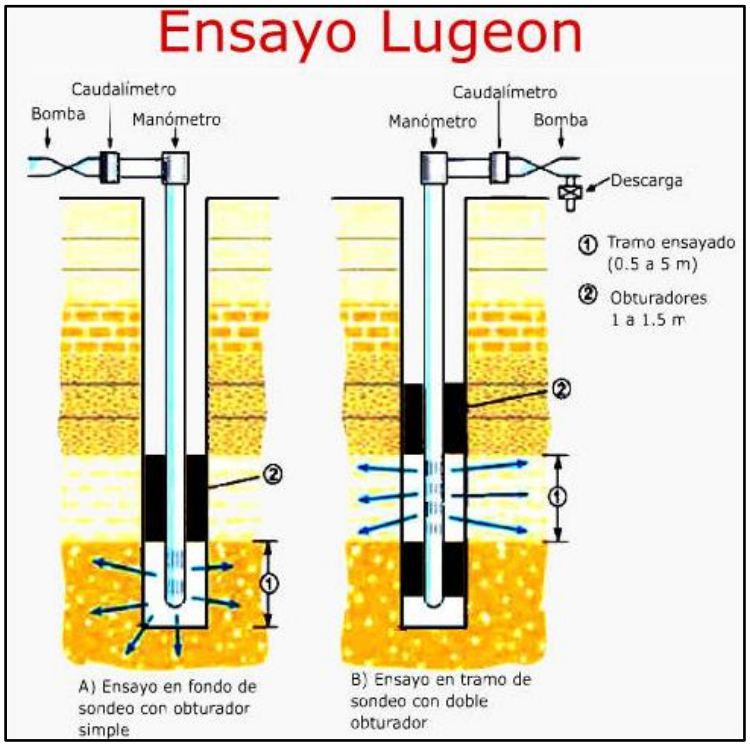
que los resultados de estos ensayos se pueden obtener in situ permiten que sean muy utilizados en el desarrollo de estudios hidrogeológicos. A continuación, se realiza una descripción de los ensayos rápidos más usuales.

4.7.3.1.1. Lugeon

De acuerdo con Jones, B. R., Van Rooy, las pruebas de Lugeon se definen como el método más común utilizado para evaluar la permeabilidad de los macizos rocosos.[100]

Su operación consiste en medir el volumen V de agua que se genera al inyectar agua a presión constante en el suelo en un tiempo t determinado. Este ensayo normalmente se realiza a una profundidad de 5 metros aislados por obturadores neumáticos. El procedimiento se divide en cinco (5) intervalos con una duración de 10 minutos y cuya presión depende de la presión máxima de prueba, que no exceda el esfuerzo mínimo in situ.[101] En la Ilustración 85 se observa la prueba del ensayo de Lugeon.

Ilustración 85. Ensayo Lugeon



Fuente: Geología web

[100] JONES, «Jones, B. R., Van Rooy, J. L., & Dippenaar, M. A. (2019). Lugeon tests at partial saturation: Experimental and empirical contributions. Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(2), 351-372. doi,» pp. http://dx.doi.org/10.1007/s00603-018-1592-0

[101] GEOLOGIAWEB, «Ensayo Lugeon [PROCEDIMIENTO Y EXPLICACIÓN] Ejemplo,» [En línea]. Available: https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/ensayo-lugeon/.

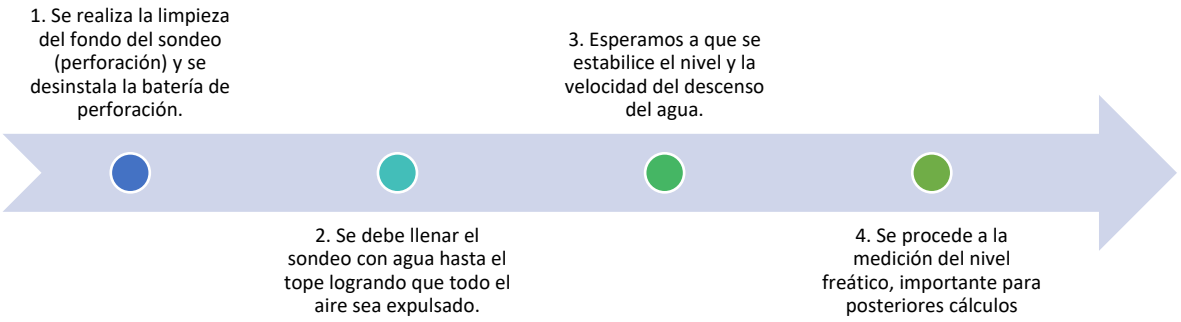
4.7.3.1.2. Lefranc

El ensayo de Lefranc es un ensayo realizado in situ que permite conocer el valor de la permeabilidad (K) de suelos bien sean permeables o semipermeables granulares que se encuentren por debajo del nivel freático y también se puede desarrollar en rocas muy fracturadas.

El desarrollo del ensayo se realiza al interior del sondeo ubicando el nivel freático y realizando la prueba por debajo del nivel de agua, esta prueba de forma general se puede aplicar con dos procedimientos diferentes, que son, de carga constante y de carga variable.

El procedimiento para desarrollar el ensayo Lefranc "se lo puede realizar a *régimen permanente* (nivel de agua constante) o con *régimen variable* (nivel de agua variable), el equipo necesario consta de: medidor del nivel de agua con precisión mayor a 1 cm, obturadores (si se desea aislar un tramo)". A continuación, en la Ilustración 86 se presentan los pasos para realizar el ensayo.

Ilustración 86. Pasos a seguir para realizar el ensayo de Lefranc

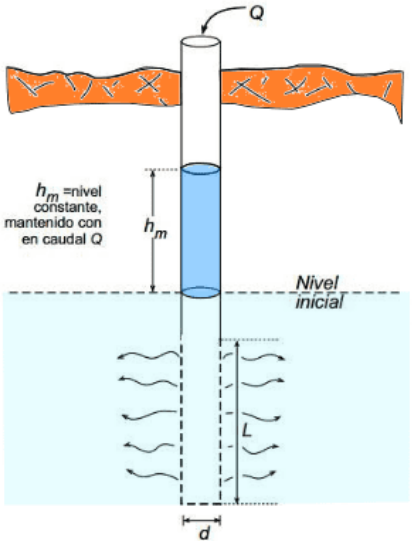


Fuente: Elaboración propia

Ensayo Lefran a Carga Constante

Este procedimiento a régimen permanente inicia con el llenado del sondeo con agua hasta el tope y se registran las mediciones de caudal necesarias para mantener el nivel de agua constante, esta medición se realiza cada cinco (5) minutos por un periodo de 45 minutos, si en el desarrollo del ensayo se observa una permeabilidad muy alta en el cual el descenso de agua es muy rápido, se debe realizar la medición del nivel del agua cada minuto durante 20 minutos, se continúa la toma de mediciones cada 5 minutos hasta completar los 45 minutos necesarios. En la Ilustración 87 se presenta una imagen de la prueba de Lefranc a carga constante.

Ilustración 87. Ensayo Lefranc a Carga Constante

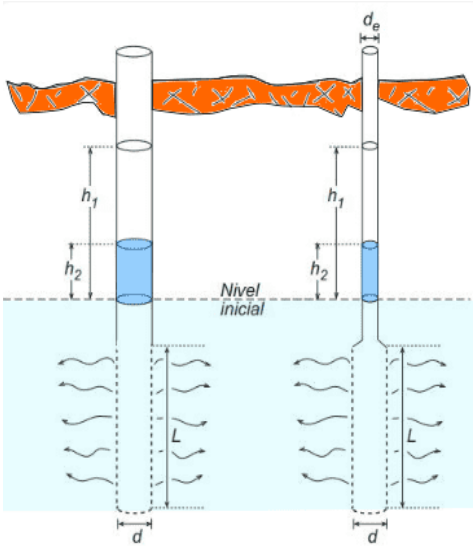


Fuente: Tomado de Geología web

Ensayo Lefran a Carga Variable

El procedimiento del ensayo Lefranc a régimen variable consiste en realizar la medición de velocidad de descenso del nivel de agua en la perforación o sondeo, esta carga no debe ser superior a 10 m tomados a partir desde el centro de la cámara filtrante. En el desarrollo del ensayo se deben realizar no menos de 5 observaciones o medidas de tiempo de acuerdo con el descenso y asenso del nivel de agua en el tubo de perforación. En la Ilustración 88 se presenta una imagen de la prueba de Lefranc a carga variable.

Ilustración 88. Ensayo Lefranc a Carga Variable.



Fuente: Tomado de Geología web

4.7.3.1.3. Ensayo SLUG

Este ensayo Slug (Barra o Lingote) se utiliza para estimar la conductividad hidráulica (k) in situ. Se fundamenta en la medida de la recuperación del nivel del agua después de un cambio instantáneo en el mismo. El ensayo consiste en la introducción de una barra en el pozo, lo que genera un ascenso casi instantáneo del nivel del agua, como si se presentara la introducción de un volumen de agua igual al de un objeto sólido.

Este cambio en el nivel del agua se realiza generando un repentino ascenso o descenso del nivel piezométrico H, que se recupera hasta condiciones iniciales. La función H (t) posteriormente se utiliza en la interpretación y evaluación de las propiedades hidráulicas del acuífero en las proximidades del sondeo. El cambio de nivel inicial puede ser negativo si se realiza una extracción de agua, o positivo en caso de inyección.

Entre los métodos de resolución para la evaluación de ensayos tipo slug, los más utilizados son el de Hvorslev (1951) y el de Bouwer y Rice (1976).

La solución de Hvorslev asume:

- Acuífero de extensión infinita.
- Homogéneo, isótropo y de espesor uniforme.
- Superficie piezométrica inicial horizontal.
- La inyección o extracción del volumen de agua es instantánea y produce un cambio en el nivel del agua.
- Las pérdidas en el pozo son despreciables.
- El acuífero es penetrado total o parcialmente.
- El pozo es considerado con un diámetro infinitesimal.
- El flujo hacia el pozo o formación es horizontal.

La solución de Bouwer y Rice asume, además de lo anterior:

- El almacenamiento en el pozo no es despreciable.
- El flujo hacia el pozo es estacionario
- No hay un flujo sobre el nivel freático.

De acuerdo con Wonly, F. La determinación precisa de la conductividad hidráulica (k) y transmisividad (T) de un acuífero es parte crucial de muchos estudios hidrogeológicos, especialmente los relacionados con el control de aguas subterráneas en áreas mineras, el mapeo de vulnerabilidad y la delimitación de zonas de protección para tomas de agua. De acuerdo con lo anterior, el ensayo del Slug es muy importante en el desarrollo de los proyectos de aguas subterráneas.[102]

[102] WOLNY, «Wolny, F., Marciniak, M., & Kaczmarek, M. (2018). A method for the estimation of dual transmissivities from slug tests. Hydrogeology Journal, 26(2), 407-416. doi:,» pp.

4.8. CAPACIDAD ESPECÍFICA

La capacidad especifica consiste la relación entre el caudal bombeado y el abatimiento o descenso del nivel del pozo. Con este valor se puede establecer la productividad relativa de una captación y se cuenta con información abundante se pueden clasificar unidades hidrogeológicas.[103]

La forma de determinar la capacidad especifica de un pozo consiste en dividir el caudal de bombeo por el máximo de abatimiento. Otra alternativa para su estimación es dividir la transmisibilidad por 130 cuando se trata de acuíferos confinados y por 95 por acuíferos libres.[104] Este parámetro puede ser determinado mediante las pruebas de bombeo.

4.8.1. SOBREEXPLOTACIÓN

El agua subterránea es un bien muy preciado el cual debemos proteger, la sobreexplotación de un acuífero consiste en que en el momento de realizar la extracción de agua del subsuelo, esta sea de un orden superior al de la infiltración o recarga natural, lo cual se convierte en un consumo progresivo de agua almacenada en el terreno lo cual lleva a diferentes consecuencias desfavorables, como por ejemplo, un costo mayor en la producción, problemas de recurso entre usuarios, y una degradación de la calidad del agua. De no controlarse a tiempo la sobreexplotación se puede tener como resultado el agotamiento del acuífero.[105] En Colombia estas explotaciones deben ser controladas por las diferentes corporaciones autónomas.

En la presente guía invitamos al lector a tener conciencia en el aprovechamiento del recurso, destinarlo solo al uso calculado inicialmente, teniendo en cuenta que la demanda excesiva afecta el acuífero como se indicó previamente.

http://dx.doi.org/10.1007/s10040-017-1682-1.

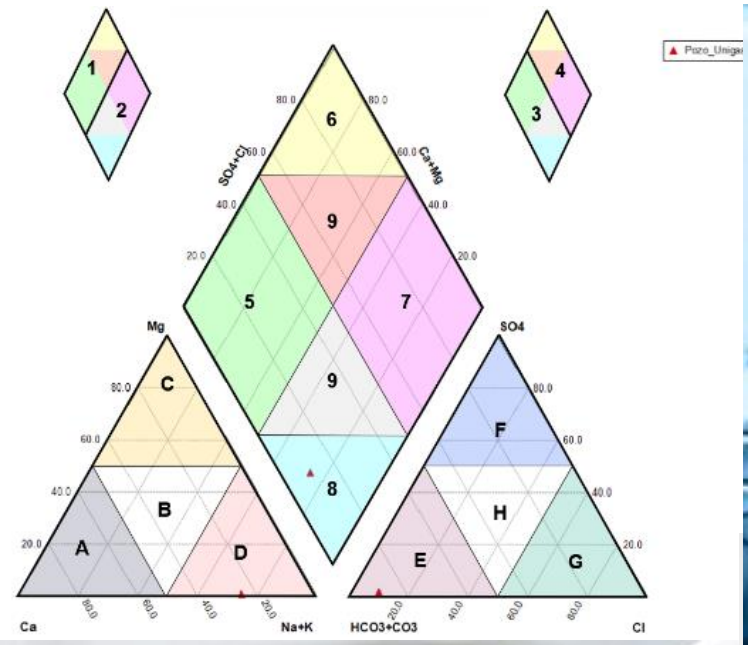
[103] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guia metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuiferos, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá.MinAmbiente, 2014; p.88.

[104] Escuela de Ingenieros Militares, Agua Subterránea y Perforación de Pozos, Santa Fe de Bogotá, 1997, Pág. 183.

[105] MINISTERIO DE FOMENTO, Sobreexplotación y contaminación de acuíferos. España, P. 2.

CAPÍTULO 5.

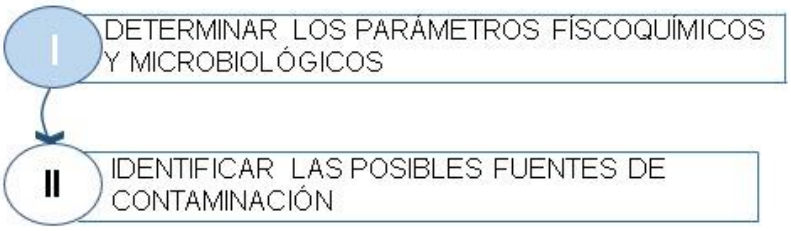
Calidad de Agua



5. CALIDAD DE AGUA

La evaluación de la calidad del agua abarca dos etapas que se pueden observar en la Ilustración 89; la primera es determinar los parámetros físico-químicos y microbiológicos sugeridos para determinar las condiciones de uso de las aguas subterráneas, sin embargo, para conseguir una información más detallada de la caracterización de la calidad del agua se recomienda consultar el Manual de Monitoreo de Agua Subterránea[106] y la segunda etapa consiste en establecer las posibles fuentes de contaminación del recurso.

Ilustración 89. Etapas de la evaluación de la calidad del agua.



Fuente: Elaboración propia

La calidad del agua es un factor de gran importancia para todos los seres vivos, ya que está directamente relacionada con la salud y la calidad de vida de una población, por esta razón, es importante realizar un llamado a la concientización, cuidado y preservación de este recurso limitado, teniendo en cuenta que las aguas subterráneas no son un recurso renovable.

5.1. PARÁMETROS FÍSICO, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS A TENER EN CUENTA EN EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA

Primero, es importante tomar muestras de la calidad del agua subterránea, ya que esta puede degradarse con el tiempo, por lo tanto, es fundamental realizar seguimiento y control de los parámetros de la calidad de agua, garantizar que estos se encuentren dentro de los límites admisibles y estar al tanto de posibles cambios en cuanto a color, turbiedad, sabor, olor, entre otros, al momento de consumirla o utilizarla, ya que esto podría advertir posible contaminación y/o alteraciones en la fuente de captación. El número de parámetros analizados depende principalmente de la finalidad del uso del agua y la fuente de contaminación local identificada.

[106] Manual de Monitoreo de Agua Subterránea. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Subdirección Ambiental. Medellín 2019.

La Tabla 35 presenta los parámetros sugeridos que deben tomarse en cuenta para el aprovechamiento de una fuente de captación de aguas subterráneas que va a ser o está siendo utilizada para cualquier uso en una población, especialmente si se trata para consumo humano.

Tabla 35. Parámetros sugeridos para monitoreo de la calidad de agua

TIPO DE ANÁLISIS	PARÁMETRO
Físico – Químico	Color, turbiedad, pH, sólidos totales disueltos, conductividad, dureza, acidez, alcalinidad total, hierro total, manganeso, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, nitratos, nitritos, aceites y grasas
Iones mayoritarios	Ca, Mg, Na, K, HCO3, Cl, SO4, PO4, NH4, NO3, NO2, carbono orgánico total
Metales pesados	Hg, Cd, Pb, Zn, Cu, Cr
Pesticidas	La elección depende de las costumbres locales, uso del suelo y las novedades observadas en el agua subterránea
Microbiológico	Coliformes totales, coliformes fecales

Fuente: Modificado de Uil et ál, 1999

Valores admisibles de agua para el consumo humano

Los valores admisibles de agua para el consumo humano en Colombia están descritos en el Decreto 2115 de 2007 el cual reglamenta la calidad del agua potable. La Tabla 36 que se presenta a continuación contiene los valores admisibles por la normatividad vigente.

Tabla 36. Valores admisibles de agua potable

CARACTERÍSTICAS	EXPRESADAS COMO	VALOR ADMISIBLE mg/l
Aluminio	Al	0.2
Antimonio	Sb	0.005
Arsénico	As	0.01
Bario	Ba	0.5
Boro	B	0.3
Cadmio	Cd	0.003
Cianuro libre y disociable	CN	0.05
Cianuro total	CN	0.1
Cloroformo	$CHCl^3$	0.03
Cobre	Cu	1.0
Cromo hexavalente	Cr+6	0.01

CARACTERÍSTICAS	EXPRESADAS COMO	VALOR ADMISIBLE mg/l
Fenoles totales	Fenol	0.001
Mercurio	Hg	0.001
Molibdeno	Mo	0.07
Niquel	Ni	0.02
Nitritos	NO_2	0.1
Nitratos	NO_3	10
Plata	Ag	0.01
Plomo	Pb	0.01
Selenio	Se	0.01
Sustancias activas al azul de metileno	ABS	0.5
Grasas y aceites	-	Ausentes
Trihalometanos totales	THMs	0.1
Calcio	Ca	60
Acidez	$CaCO_3$	50
Hidroxidos	$CaCO_3$	<LD
Alcalinidad total	$CaCO_3$	100
Cloruros	Cl	250
Dureza total	CaCO3	160
Hierro total	Fe	0.3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0.1
Sulfatos	$SO4^{-2}$	250
Zinc	Zn	5
Fluoruros	F	1.2
Fosfatos	$PO4^{-3}$	0.2

Fuente: Las aguas subterráneas un enfoque práctico. INGEOMINAS

5.2. FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Las fuentes de contaminación de aguas subterráneas pueden deberse a factores naturales como a las sustancias naturales presentes en los suelos y rocas y a la geología del terreno o por la acción del hombre.

Las aguas subterráneas se pueden contaminar por elementos químicos debido a las actividades industriales, domésticas, ganaderas, agrícolas e hidrocarburos, entre otras, presentes en la superficie, también por el avance continuo y algunas veces desmedido de urbanización o sobreexplotación y en regiones especiales como las zonas rurales del país, es común la contaminación a causa de la implementación de pozos sépticos.

A continuación, en la Tabla 37, se presentan las fuentes de contaminación más comunes de las aguas subterráneas:

Tabla 37. Fuentes más comunes de contaminación de las aguas subterráneas

ACTIVIDAD DE CONTAMINACIÓN	FUENTES DE CONTAMINACIÓN
Provenientes de la descarga de sustancias	- Percolación de tanques sépticos y pozos negros - Pozos de inyección - Aplicación superficial de agua residual
Provenientes de lugares usados para almacenar, tratar y disponer sustancias	- Rellenos sanitarios y basureros - Depósitos de residuos peligrosos - Apilamiento de desechos - Cementerios - Depósitos de almacenamiento superficiales y subterráneos de derivados del petróleo - Sitios de disposición de desechos radiactivos
Debido al transporte de sustancias	- Líneas de conducción - Transporte de materiales y operaciones de transferencia
Como consecuencia de diversas actividades	- Irrigación (aplicaciones de pesticidas, herbicidas y fertilizantes) - Operaciones de alimentación de animales - Desagüe urbano - Contaminantes atmosféricos de fuentes industriales y municipales - Minería y drenaje en minas
Provenientes de conductos o descargas inducidas	- Pozos de producción de petróleo y gas - Pozos de observación y exploración - Construcción de excavaciones
De origen natural	- Interacciones del agua superficial y subterránea - Lixiviado natural - Intrusión salina o influjo de agua de diferente calidad

Fuente: Modificado de Usepa, 1987

5.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA

La representación gráfica es una herramienta común para interpretar los análisis químicos de las aguas subterráneas, existen varias maneras de representarlos gráficamente, las representaciones gráficas usualmente empleadas son el Diagrama de Piper y la Metodología Drastic, la metodología del Diagrama de Piper

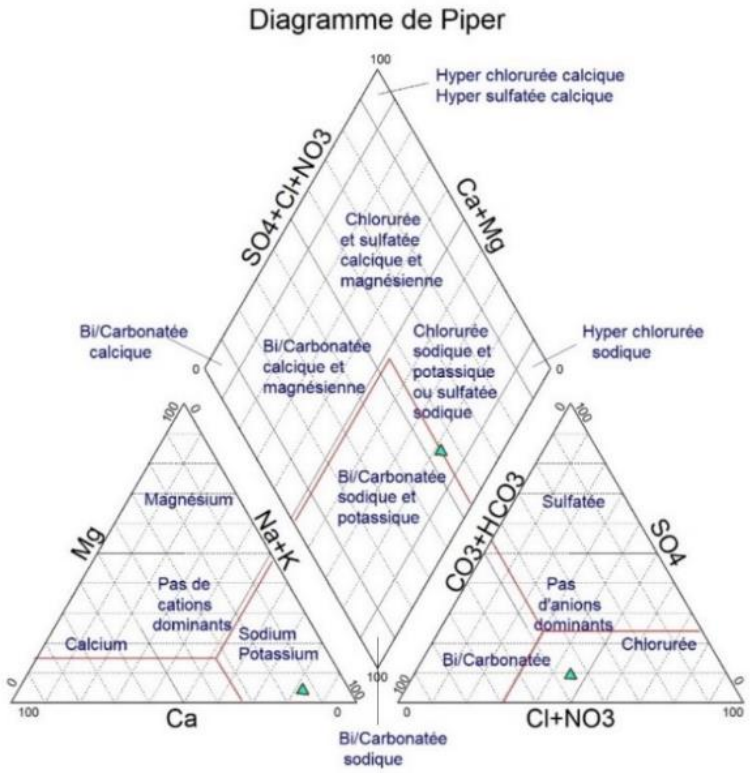
se describe a continuación:

5.3.1. DIAGRAMA DE PIPER

Fue propuesto por Arthur M. Piper en el año 1994 para representar químicamente una muestra o muestras de agua.

Es un esquema trilineal que permite observar la composición iónica de múltiples muestras e identificar la composición geoquímica de las aguas, así como algunos procesos que pueden controlar o alterar dicha composición. Consiste en dos triángulos inferiores que describen las composiciones relativas de cationes (triángulo izquierdo) y aniones (triángulo derecho) y un diamante en la parte superior que combina la composición de cationes y aniones mayoritarios. Finalmente, la composición relativa de la muestra queda indicada por un punto en el diamante, el cual permite clasificarla con base en sus facies hidroquímica, según el o los iones dominantes.[107]

Ilustración 90. Representación del diagrama de Piper



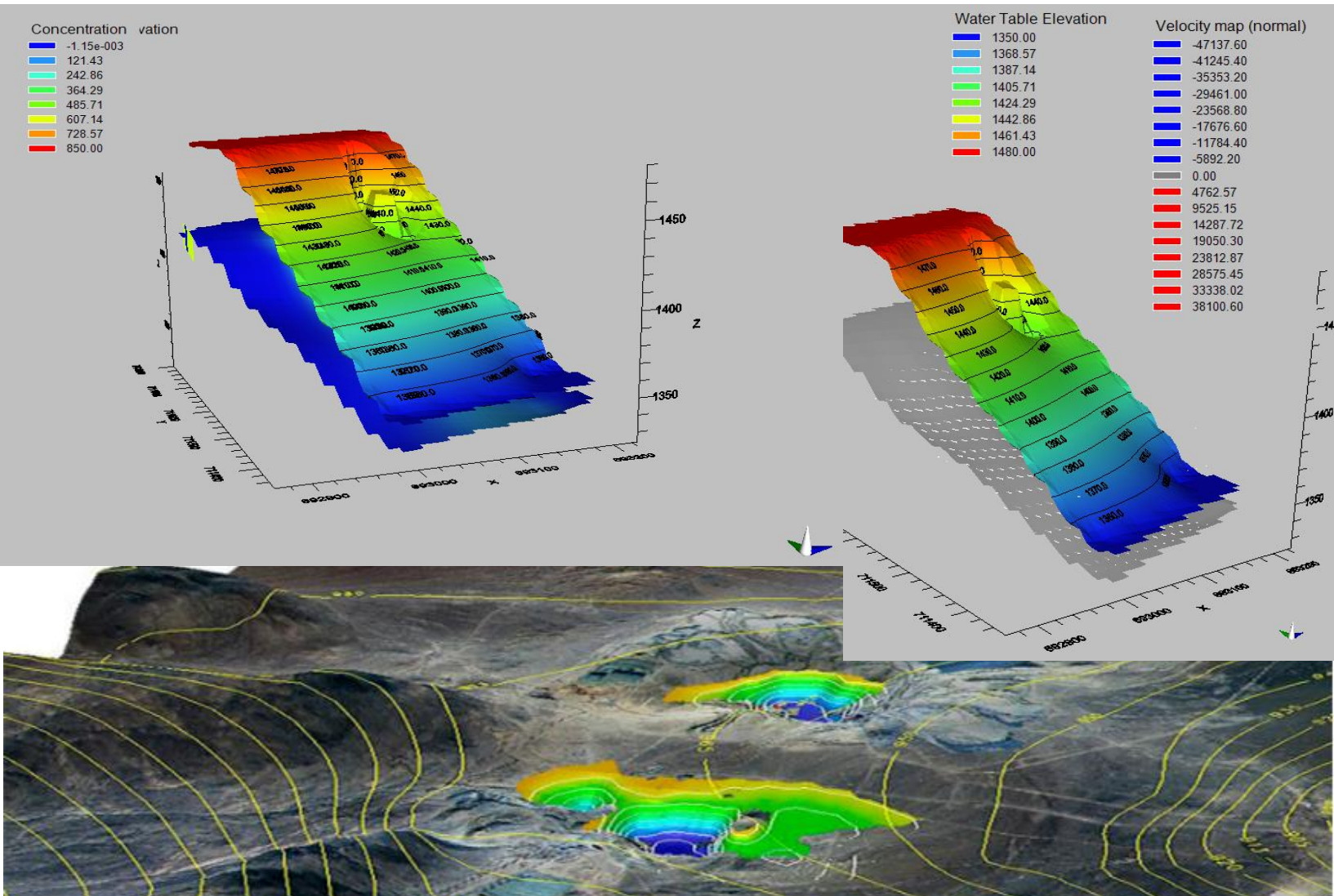
Fuente: Appelo y Postma, año 1996

[107] Appelo y Postma. Geoquímica, Aguas Subterráneas y Contaminación. Año 1996

CAPÍTULO 6.

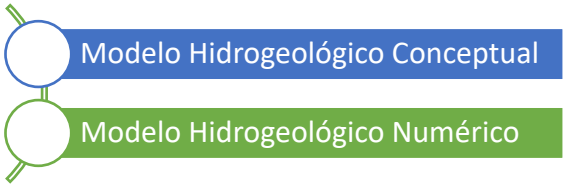
Modelo Hidrogeológico

Fuente: gidahatari



6. MODELO HIDROGEOLÓGICO

En este capítulo se presentará un anexo a la guía, el cual será una introducción para análisis específicos posteriores a la extracción de aguas subterráneas en el que se puede realizar una representación de las diferentes variables que se presentan en el ciclo hidrológico de una región o de un punto en particular, o de las posibles afectaciones al acuífero de estudio. Los modelos hidrogeológicos se dividen en dos grupos principalmente, como son:

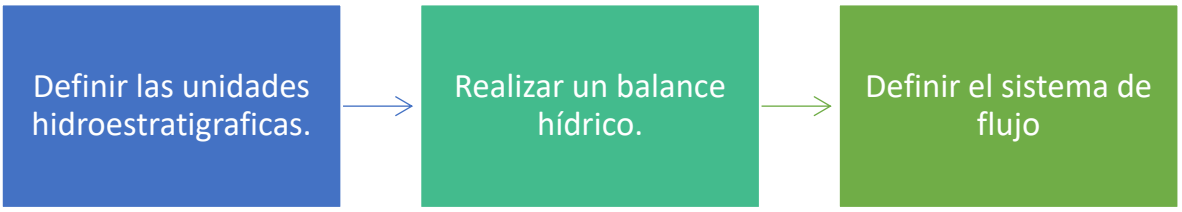


A continuación, se describen los tipos de modelos hidrogeológicos.

6.1. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos. Para entender la circulación de agua subterránea en el subsuelo se debe definir lo que lo que se considera un modelo hidrogeológico conceptual, el cual es un modelo que permite identificar las condiciones en las cuales se presenta la recarga y descarga de agua, cuáles son las características litológicas y geométricas de la roca permeable, cuáles son las secuencias estratigráficas y las respectivas condiciones hidrogeológicas locales: como se encuentran las diferentes direcciones de flujo del agua subterránea, que gradientes hidráulicos se presentan en el acuífero, transmisividad y capacidad de almacenamiento, porosidad entre otras.[108]

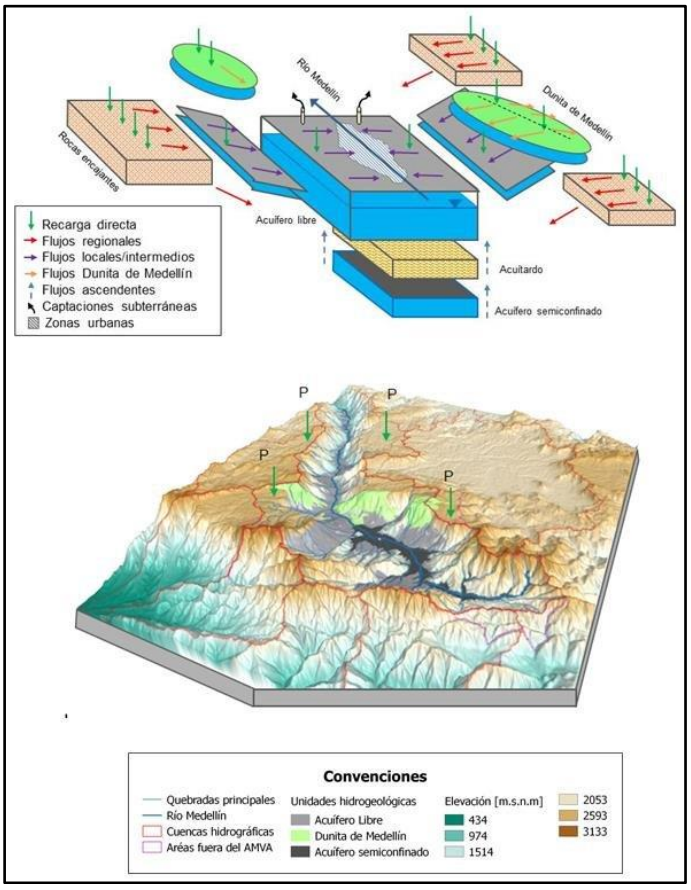
Las etapas básicas para construir el modelo hidrogeológico conceptual se presentan a continuación:



A continuación, en la Ilustración 91 se puedo observar la representación de un modelo conceptual

[108] VÉLEZ OTÁLVARO. Maria Victoria. A. Las Aguas Subterráneas Un Enfoque Práctico. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, 2011.117p.

Ilustración 91. Modelo hidrogeológico conceptual del Valle de Aburrá



Fuente: Bastidas Osejo, Breiner

Una característica de un modelo hidrogeológico conceptual es que es dinámico debido a que se construye a partir de variables temporales como las climatológicas, hidrológicas e hidráulicas y por lo tanto a medida que se modifique la información o se reevalúe la existente, éste deberá ser ajustado a las nuevas condiciones. [109]

Luego de definir las etapas de un modelo hidrogeológico, para establecer el modelo hidrogeológico conceptual de un acuífero, es necesario recolectar, analizar, evaluar e integrar información sobre componentes como la geología, geofísica, inventario de puntos de agua subterránea, hidrología, hidroquímica, hidráulica subterránea, entre otros.[110]

[109] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guia metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuiferos, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá.MinAmbiente, 2014; p.35
[110] Ibid.

Dentro de las bondades de un buen modelo hidrogeológico conceptual se permite abordar más fácilmente, aspectos como la identificación de las zonas de recarga, tránsito y descarga, su relación con otros acuíferos, con las aguas superficiales y marinas, y de esta manera lograr establecer las medidas para el manejo del acuífero, elaborando programas para la protección y el aprovechamiento sostenible del agua subterránea. [111]

Si se desea más información respecto a los modelos hidrogeológicos conceptuales se puede consultar la “GUÍA METODOLÓGICA PARA LA FORMULACIÓN DE PLANES DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUÍFEROS” del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

6.2. MODELO NUMÉRICO

Se considera un modelo hidrogeológico numérico a la formulación de las variables que hacen parte de un sistema hidrogeológico en cual se transportan todos los elementos del sistema físico que se establecieron en el modelo hidrogeológico conceptual a una formulación matemática. Esto, con el fin de realizar una estimación cuantitativa más precisa de las variables de estado (niveles y concentraciones).

Este tipo de modelos permite evaluar el comportamiento de un acuífero, representando escenarios hipotéticos para determinar qué parámetros resultan críticos o desfavorables en caso de producirse. Pero, además de constituir una herramienta de simulación, ofrecen un camino para avanzar en el entendimiento de los sistemas acuíferos, para diseñar un óptimo plan de explotación y determinar las medidas de mitigación, en caso de que se produzcan afecciones no deseadas al sistema de explotación.[112]

Matemáticamente el modelo corresponde a la solución aproximada de una ecuación diferencial en un dominio representado por elementos o celdas discretas, cuyas condiciones de borde e iniciales son conocidas. Se obtiene la solución en los puntos (nodos) del dominio representativos de las celdas o elementos.

La conceptualización del sistema acuífero permite disponer de un marco simplificado, pero aún continuo y con los elementos reales del sistema hidrogeológico, tales como ríos, límites hidrológicos y/o geológicos, tasas de precipitación, entre otros. En esta etapa es necesario representar dichos elementos en el modelo numérico, lo cual requiere discretizar el área de estudio y el tiempo, distribuyendo espacialmente los parámetros de los distintos fenómenos que gobiernan el flujo y transporte de las aguas subterráneas e incluyendo algunas características particulares del funcionamiento del acuífero mediante condiciones de borde.

[111] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guia metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuiferos, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá.MinAmbiente, 2014; p.35
[112] Aquist, «Aquist - La elaboración del Modelo Hidrogeológico Numérico - AQUIST,» [En línea]. Available: https://www.aquist.cl/2021/02/26/elaboracion-del-modelo-hidrogeologico-numerico/.

Los atributos básicos que se deben definir en la construcción del modelo numérico son:

- Límites y geometría del área o dominio de modelación.
- Nivel de detalle de la discretización.
- Tipo de modelo (régimen permanente o transiente) y atributos en relación al tiempo.
- Condiciones de borde y condiciones iniciales.
- Tasas de recarga y otros flujos de entrada/salida.
- Asignación de parámetros al modelo (parámetros de flujo y transporte).
- Selección de pozos de observación y series de datos asociadas.

En términos generales existen diversos tipos de modelos, como lo son los físicos, analógicos y analíticos, entre otros, siendo los modelos numéricos los que, con base en la capacidad de cálculo de los computadores y el desarrollo de códigos de programación y software, permiten resolver y cuantificar el comportamiento del flujo y transporte en sistemas hidrogeológicos complejos, realizando una discretización del área de interés y de las ecuaciones gobernantes en un solo lugar. En la Tabla 38 se presenta una tabla de los programas más comunes para la elaboración de un modelo hidrogeológico.

Tabla 38 Ejemplos de Software y códigos para modelación hidrogeológica

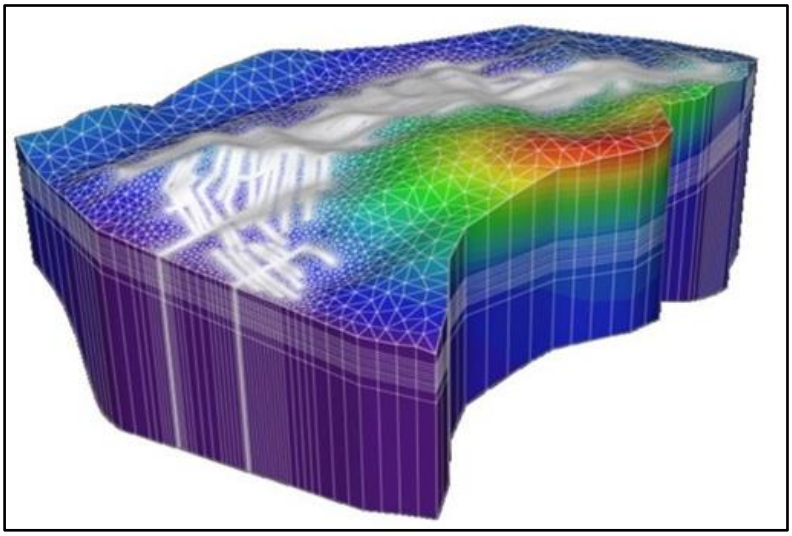
Objetivo	Tipo de flujo	Aplicación Práctica	Software/ Código
Modelar flujo	Flujo saturado	Aplicable a la mayoría de los problemas prácticos, por ejemplo, para flujo en los valles transversales	GMS
			Groundwater Vistas
			Modelmuse
			Visual Modflow
	Flujo no saturado	Puede ser importante de modelar para casos don- de sea relevante representar la conexión entre la hidrología subterránea y superficial a través de procesos como la infiltración y evapotranspiración	Feflow
			GMS (Femwater)
			Hydrus 1D
			VS2DI
	Flujo con densidad variable	Fundamental para la representación correcta de la dinámica de flujos en salares y acuíferos costeros	Feflow
			GMS (Femwater)
			Seawat
			Sutra
	Flujos en acuíferos fracturados y medios Kársticos	Uso para condiciones muy particulares en las cuales existe una marcada anisotropía del sistema que se busca representar	Feflow
			GMS
			Groundwater Vistas
			Visual Modflow

Objetivo	Tipo de flujo	Aplicación Práctica	Software/ Código
Modelar transporte	Flujo saturado	Aplicable a la mayoría de los problemas prácticos, por ejemplo, para flujo en los valles transversales	GMS
			Groundwater Vistas
			Modelmuse
			Visual Modflow
	Flujo no saturado	Puede ser importante de modelar para casos don- de sea relevante representar la conexión entre la hidrología subterránea y superficial a través de procesos como la infiltración y evapotranspiración	Feflow
			GMS (Femwater)
			Hydrus 1D-2D/3D
			VS2DI

Fuente: Tomado de Guía para modelos de agua subterránea, Chile.[113]

A continuación, en la Ilustración 92 se observa una representación de un modelo numérico.

Ilustración 92. Modelo numérico



Fuente: AguaEx – Geociencias

[113] MINISTERIO DEL MEDIO MABIENTE, Guía Para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA. Chile, 2012. P. 108.

Finalmente, una vez elaborado el modelo hidrogeológico se puede realizar una evaluación de la vulnerabilidad del acuífero en estudio, una de las metodologías más usuales para realizar esta evaluación es la metodología Drastic, la cual se describe a continuación.

6.2.1. METODOLOGÍA DRASTIC

Desarrollado por Aller en el año 1987, el propósito principal consistía en evaluar la vulnerabilidad que tenían los acuíferos bajo ciertos criterios con el fin de determinar la susceptibilidad del acuífero ante posibles contaminantes. Valora siete (7) parámetros: profundidad del agua (D), recarga (R), litología del acuífero (A), naturaleza del suelo (S), pendiente del terreno (T), zona no saturada (I) y permeabilidad del acuífero (C). Este método se adapta a acuíferos libres y confinados, pero no a los semiconfinados.

Este método es propuesto generalmente como metodología para la caracterización hidrogeológica y la estimación de vulnerabilidad de los acuíferos para tener presente en los estudios de impacto ambiental.

Finalmente se presenta el documento como una guía conceptual para la extracción de aguas subterráneas en Colombia, con el fin de que pueda ser empleado para consulta con fácil entendimiento para cualquier tipo de persona, ya sea natural o jurídica que vaya a realizar actividades que involucren alguno de los acuíferos mencionados en el presente documento.

BIBLIOGRAFÍA

1. CICLOHIDROLOGICO, « Perez, G. Precipitación [PRECIPITACIÓN Y TIPOS DE PRECIPITACIÓN] Ejemplo,» [En línea]. Available: https://www.ciclohidrologico.com/precipitacin.

2. Escuela de Ingenieros Militares, Agua Subterránea y Perforación de Pozos, Santa Fe de Bogotá, 1997, Pá2g. 183.

3. FREEPIK, «Vector Premium, [POZO PIEDRA AGUA LIMPIA-ARROJA BALDE AGUA ILUSTRACION PLANA] pozo de piedra con agua limpia arroja un balde de agua,» [En línea]. Available: https:// https://www.freepik.es/vector-premium/pozo-piedra-agua-limpia-arroja-balde-agua-ilustracion-plana_13717080.htm.

4. GEOLOGIAWEB, «Ensayo Lugeon [PROCEDIMIENTO Y EXPLICACIÓN] Ejemplo,» [En línea]. Available: https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/ensayo-lugeon/.

5. GIDAHATARI, « ¿Cómo el metano entra a los pozos de agua?,» [En línea]. Available: https://gidahatari.com/ih-es/como-el-metano-entra-a-los-de-pozos-de-agua.

6. Gómez-Niño, H.I. (2020). Análisis de niveles piezométricos y patrones de captación de agua subterránea en el acuífero cuaternario de Yopal, Casanare, Colombia. *Boletín de Geología, 42*(2), 89-103. doi: 10.18273/revbol.v42n2-2020005.

7. IDEAM, Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluacion regional del agua. 2013. Bogotá, D. C. 276 pags.

8. IDEAM, Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluacion regional del agua. 2013. Bogotá, D. C. 276 pags.

9. IDEAM. Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas - Contenidos del Taller de Formación. 180 págs. Diciembre 2015. Bogotá, D. C., Colombia 2015, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.

10. INGENIERIAREAL, «tipos de pozos, [TIPOS DE POZOS PARA EXTRAER AGUA SUBTERRANEA] Pozos Hincados,» [En línea]. Available: https://ingenieriareal.com/tipos-de-pozos-para-extraer-agua-subterranea/.

11. JONES, «Jones, B. R., Van Rooy, J. L., & Dippenaar, M. A. (2019). Lugeon

tests at partial saturation: Experimental and empirical contributions. Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(2), 351-372. doi,» pp. http://dx.doi.org/10.1007/s00603-018-1592-0.

12. KBS, «en-de, applications, water technology, [WATER EXTRACTION] Water Extracion,» [En línea]. Available: https://www.ksb.com/en-de/applications/water-technology/water-extraction.

13. LOPEZ CUALLA. Ricardo. A. Elementos de Diseño para acueductos y alcantarillados. Segunda Edición Novena reimpresión. Bogotá, 2015.521p.

14. M. d. A. Subterránea, «URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA. Manual de Agua Subterránea (Montevideo, 2012). COLLAZO CARABALLO, María Paula y MONTAÑO XAVIER, Jorge.,» [En línea].

15. MASSENZAPERFORADORAS, «Perforación por aire comprimido [Metodos de Perforación] Perforación por aire comprimido,» [En línea]. Available: https://www.massenzaperforadoras.es/perforacion-por-aire-comprimido/.

16. MEXWATT, «bombas Solares, [BOMBAS SOLARES] Bombas solares para pozos y cisternas,» [En línea]. Available: https://www.mexwatt.com/bombas-solares.

17. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guia metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuiferos, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá.MinAmbiente, 2014; p.88.

18. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Perforación De Pozos Profundos De Pequeño Diámetro. 2003. Bogotá, D. C. 55 pags.

19. MINISTERIO DE FOMENTO, Sobreexplotación y contaminación de acuíferos. España, P. 2.

20. MINISTERIO DEL MEDIO MABIENTE, Guía Para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA. Chile, 2012. P. 108.

21. Minvivienda, «MINISTERIO DE VIVIENDA, INICIO, Resolución 0330 de 2017, Bogotá,2017.

22. Minvivienda, «MINISTERIO DE VIVIENDA, INICIO, Resolución 0799 de 2021, Bogotá,2021.

23. Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. Lima,

Perú.Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física (8° edición). Madrid, España: Pearson Educación.

24. Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. Lima, Perú.
Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física (8° edición). Madrid, España: Pearson Educación.

25. SALDARRIAGA. Juan. Hidráulica de Tuberías Abastecimiento de agua, Redes, Riegos. Cuarta Impresión. Bogotá, 2015.662p.

26. SANCHEZ SAN ROMAN. F. Javier. Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca, 2017.391p.

27. SBERT, Joan. «Els molins de vent mallorquins». En VALERO MARTÍ, Gaspar (ed.) Elements de la societat pre-turística mallorquina. Palma: Conselleria de Cultura, Educació i Esports, 1989 (p. 91-108).

28. SSWM.INFO, «es, gass perspective es, tecnologias de, tecnologias de abastecimiento de agua, distribucion, [BOMBEO DE AGUA MANUAL] Introducción» [En línea]. Available: https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/distribucion/bombeo-de-agua-manual.

29. UNIDAD DEL PATRIMONIO HISTÓRICO INDUSTRIAL. Molins_extr_a_Es - MOLINOS DE VIENTO DE EXTRACCIÓN DE AGUA. 12 págs. Mallorca., España, Unidad del Patrimonio histórico industrial.

30. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Grupo de Tecnologías Apropiadas, Bombas Manuales. 2015. Legánes, España, 2015.1 pags.

31. VÉLEZ OTÁLVARO. Maria Victoria. A. Las Aguas Subterráneas Un Enfoque Práctico. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, 2011.117p.

32. WOLNY, «Wolny, F., Marciniak, M., & Kaczmarek, M. (2018). A met.hod for the estimation of dual transmissivities from slug tests. Hydrogeology Journal, 26(2), 407-416. doi:,» pp. http://dx.doi.org/10.1007/s10040-017-1682-1.