

DELIMITACIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA- CASO DE ESTUDIO: ACUÍFERO MULTICAPA DEL EJE BANANERO DEL URABÁ ANTIOQUEÑO-COLOMBIA

Teresita Betancur Vargas¹, Jhon Camilo Duque Duque², Cristina Martínez Uribe³, Daniel Alejandro García Giraldo⁴, Pedro Pablo Villegas Yepes⁵, Vanessa Paredes Zuñiga⁶

¹Teresita Betancur Vargas, Doctora en Ingeniería, Universidad de Antioquia Medellín, Colombia, teresita.betancur@udea.edu.co

²Jhon Camilo Duque Duque, Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia Medellín, Colombia, jhon.duqued@udea.edu.co

³Cristina Martínez Uribe, Magíster en Geotecnia, Universidad de Antioquia Medellín, Colombia, cristina.martinez@udea.edu.co

⁴Daniel García Giraldo, Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia Medellín, Colombia, daniel.garcia@udea.edu.co

⁵Pedro Pablo Villegas Yepes, Magíster en Ingeniería, Corporación para el Desarrollo de Urabá –CORPOURABA, Apartado, Colombia, pvillegas@corpouraba.gov.co

⁶Vanessa Paredes Zuñiga, Magíster en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos, Corporación para el Desarrollo de Urabá –CORPOURABA, Apartado, Colombia, v.paredes@corpouraba.gov.co

RESUMEN

El conocimiento del Modelo Hidrogeológico Conceptual permite adoptar y adaptar un procedimiento adecuado para cada caso de estudio, considerando acuíferos libres y acuíferos confinados, teniendo en cuenta las diferencias estructurales entre rocas duras, rocas blandas y depósitos no consolidados; y evaluando el rol de la textura y la capacidad de infiltración del suelo, en la dimensión de la función de la recarga directa. Para el sistema hidrogeológico del Eje Bananero del Urabá Antioqueño- Colombia la tarea de entender la recarga puso de manifiesto la necesidad de establecer una escala de calificación para evaluar el factor estructural en rocas blandas y depósitos no consolidados y definir categorías de importancia, basados en propiedades texturales y tasas de infiltración para las zonas de recarga directa difusa en acuíferos libres; también se determinó un procedimiento para delimitar zonas asociadas a las unidades hidrogeológicas que subrayasen a los acuíferos confinados.

Palabras clave: Aguas subterráneas, áreas de recarga, gestión de recursos hídricos.

Recibido: 13 de Mayo de 2020. Aceptado: 14 de Diciembre de 2020

Received: May 13, 2020 Accepted: December 14, 2020

DELIMITATION OF POTENTIAL RECHARGE ZONES - CASE STUDY: MULTILAYER AQUIFER OF EJE BANANERO DEL URABÁ ANTIOQUEÑO-COLOMBIA

ABSTRACT

Knowledge of the Conceptual Hydrogeological Model allows adopting and adapting an appropriate procedure for each study case, considering phreatic and confined aquifers, taking into account differences in the structures between hard rocks, soft rocks and unconsolidated deposits; and evaluating the role of soil texture and infiltration capacity in the direct recharge function. For the hydrogeological system of "Eje Bananero del Urabá Antioqueño" - Colombia, direct recharge areas of major and minor importance and indirect recharge areas of high, medium and low importance were delimited. With this project, a method was found to evaluate structural factors in soft rocks and unconsolidated deposits; also, categories of importance in the recharge were defined, based on textural properties and infiltration rates for phreatic aquifers. Finally, a procedure was defined to delimit zones associated with hydrogeological units that overlay confined aquifers.

Keywords: Groundwater, recharge areas, water resources management.

Cómo citar este artículo: T. Betancur, J. Duque, C. Martínez, D. García, P. Villegas, V. Paredes. "Delimitación de las potenciales zonas de recarga-caso de estudio: acuífero multicapa del eje bananero del Urabá Antioqueño-Colombia", *Revista Politécnica*, vol.16, no.32 pp.41-55, 2020. DOI:10.33571/rpolitec.v16n32a4

1. INTRODUCCIÓN

En términos generales, se denomina recarga al proceso por el que se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más importante en general) y de las aguas superficiales (importante en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otro acuífero o acuitardo, si los mismos son externos al acuífero o sistema acuífero en consideración. La recarga por la lluvia y en general la producida a partir de aguas superficiales afecta a sistemas acuíferos freáticos, es decir que limitan superiormente con el medio no saturado, pero por efecto hidráulico modifica los niveles piezométricos de las partes que están confinadas [1].

La recarga a los acuíferos es comúnmente un fenómeno complejo, con numerosas ramificaciones e interrelaciones en cuanto a procesos. Hay que considerar dichos procesos de forma simplificada y agregada para poder llegar a resultados prácticos a la escala apropiada a cada caso [1].

Dentro de la definición de un Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) cuando se entra a evaluar el componente recarga, se considera la cuantificación de la misma, para lo cual se han propuesto diferentes metodologías, siendo la más ampliamente utilizada, la de balance por unidad de suelo (SWB, Soil Water Balance), procedimiento que permite estimar la recarga directa distribuida de agua subterránea, al calcular los componentes del balance de agua en los pasos diarios usando una versión modificada de Thornthwaite-Mather [2] [3]. Como lo señala Bastidas (2019) [4] las bases teóricas de este modelo se remiten a Dripps [5] y Dripps y Bradbury [6].

Por otra parte, se destaca la necesidad de considerar las fuentes del agua que llega al acuífero y las áreas a través de las cuales, se da su paso hacia la zona saturada de la corteza terrestre [7]. En esta última circunstancia es importante tener en cuenta que en muchos casos, y especialmente para los acuíferos confinados, las zonas de recarga pueden estar a grandes distancias, configurándose sistemas de flujo locales, intermedios o regionales [8]. Las evidencias de estos flujos se definen desde la piezometría y la geomorfología del terreno [9] y se verifican a partir de la utilización de técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas que determinan el origen y el tiempo en que se produce la recarga [10].

Para la definición de las zonas de recarga se han propuesto diferentes metodologías que relacionan un conjunto de parámetros que, según las condiciones de las zonas de estudio, pueden tener mayor influencia sobre la recarga al sistema acuífero. Factores como el relieve, las características texturales de la zona no saturada y las condiciones estructurales de las rocas, normalmente se tienen en cuenta (De Giglio et al., 2018). La cobertura y el uso del suelo son considerados como factores de importancia por Chachadi [11], Arevalo y Carrillo [12], Deepa et al., [13]. En casos como la cuenca del río Hualian en Taiwán [14] y de la cuenca del río Vellar en la India [13] se ha considerado el drenaje como parámetro adicional. La ocurrencia de manantiales se propuso por Betancur et al., [15] y Escobar et al., [16].

Para Colombia se ha establecido que el 75% del territorio tiene condiciones favorables para el almacenamiento de aguas subterráneas, sin embargo, menos del 25% de este potencial se ha explorado [17]. El sistema hidrogeológico del Eje Bananero de Urabá es uno de los más estudiados y mejor conocidos; desde 1995 cuando el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en ese entonces INGEOMINAS, elaboró el primer MHC para esta región, la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA) ha continuado en la labor de mejorar el conocimiento de este recurso, vital para los habitantes de su jurisdicción y estratégico para el desarrollo económico y el sostenimiento de los ecosistemas relacionados.

El propósito de este trabajo es el de definir y priorizar las potenciales zonas de recarga del sistema acuífero del Eje Bananero de Urabá, diferenciando el acuífero libre y el acuífero confinado multicapa, aplicando una estrategia metodológica que se ajuste a las características del MHC, de manera que CORPOURABA pueda consolidar argumentos para definir medidas de manejo y protección y establecer condiciones asociadas a la recarga que pudieran constituir determinantes ambientales para el ordenamiento territorial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Zona de estudio

La zona de estudio tiene una extensión de 2.129 km², se localiza en la región de Urabá, al noroccidente de Colombia, está limitada al norte por el Mar Caribe, al oriente por la Serranía de Abibe y al occidente por el Río León (Fig. 1). Fisiográficamente, las mayores alturas (que no superan 600 m.s.n.m) se encuentran en la Serranía de Abibe, desde donde se desciende a la planicie aluvial hasta la costa [18]. El clima es cálido tropical, con lluvias distribuidas entre los meses de marzo y noviembre registrando un promedio anual que varía entre 3.800 mm/año al sur y 2.100 mm/año al norte [19].

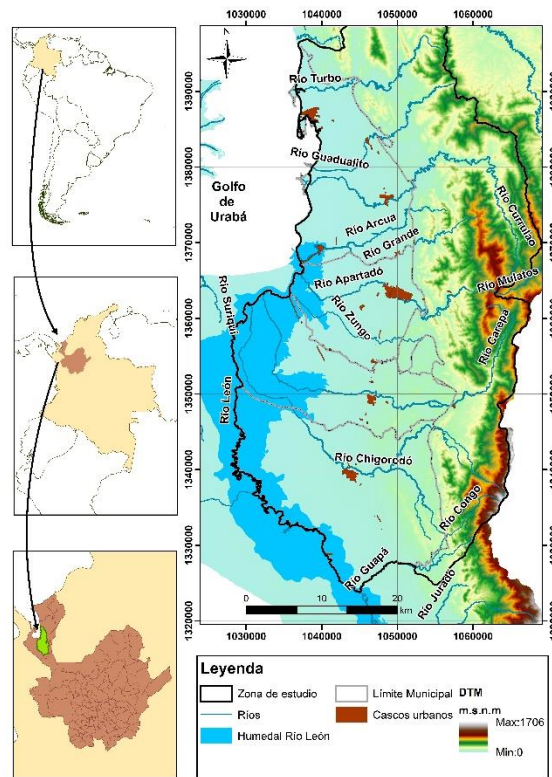


Fig 1. Localización de la zona de estudio

La Serranía de Abibe está formada por rocas sedimentarias clásticas del Neógeno, pertenecientes a la Formación Pavo (Ngpv), la Formación Arenas Monas (Ngam) o a la Formación Corpa (Ngco). Sobre estas unidades se han depositado importantes espesores de material aluvial, constituyendo terrazas (Qt) o depósitos (Qal) del río León, de sus tributarios o de corrientes que vierten sus aguas al mar. Las Fallas Turbo, Apartadó y El Dos marcan los principales rasgos estructurales en la región [18].

En la región habitan más de 450.000 personas, la principal actividad económica es la actividad agroindustrial de cultivo y exportación de Banano [20] [21] [22].

En este territorio, el agua subterránea es fuente de abastecimiento para poblaciones urbanas y rurales y se utiliza intensamente en la industria del banano. La demanda de agua subterránea supera los 24 millones de metros cúbicos al año [23].

El sistema hidrogeológico está formado por un nivel somero con características de acuífero libre, y un acuífero confinado formado por una compleja intercalación de capas y lentes permeables y semipermeables que le confieren el carácter de multicapa (Fig.2). El sistema libre es objeto de recarga directa y difusa, mientras que el sistema multicapa sería alimentado desde las zonas en que aflora, en la Serranía, o por goteo desde el acuífero libre a través de capas arcillosas en su base [24].

Según cálculos obtenidos mediante balance por el método SWB [4] la recarga potencial directa anual, al acuífero libre, es de 756,5 mm.

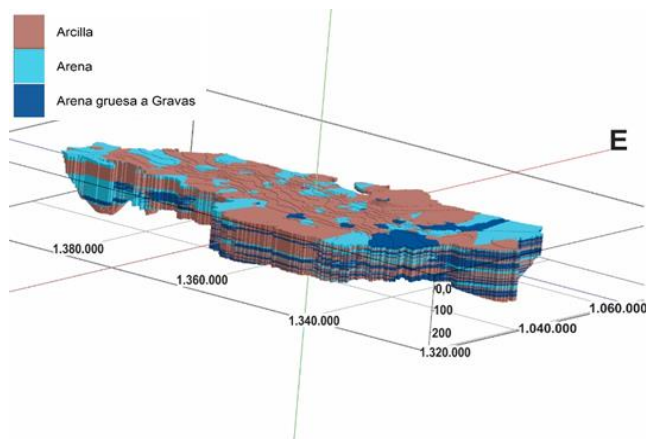


Fig 2. Sistema Hidrogeológico del Eje Bananero

2.2 Método

En la Tabla 1 se resumen, según varias propuestas metodológicas, las variables requeridas para hacer la evaluación que permite delimitar zonas de recarga de acuíferos.

Tabla 1. Parámetros propuestos para delimitación de zonas de recarga

Autor-Año	Parámetros
Chachadi, 2015 [11]	Pendiente del suelo, Coeficiente de almacenamiento del acuífero, Cobertura del suelo, Profundidad del nivel del agua, Influencia de la superficie Geológica y Topografía.
Arévalo y Carrillo, 2013 [12]	Tipo de suelo, vegetación, Elevación topográfica, presencia de manantiales termales y cuerpos de agua perennes y litología
Yeh, Cheng, Lin, y Lee, 2016 [14]	Litología, Uso y cobertura del suelo, lineamientos de las estructuras geológicas, Drenaje y pendiente del terreno.
Deepa, Venkateswaran, Ayyandurai, Kannan, y Vijay Prabhu, 2016 [13]	Drenaje, Geología, Pendiente del Terreno, Tipo de suelo, uso y cobertura del suelo y lineamiento de las estructuras geológicas.
Betancur et al 2018 y Escobar et al 2017 [15] [16]	Topografía, patrones Estructurales, Patrones Texturales, Capacidad de Infiltración y Presencia de Manantiales.
IDEAM, en elaboración	Geología, Relieve, Deformación estructural, Cobertura y textura del suelo

Teniendo en cuenta la información disponible, se programó el trabajo de campo necesario para evaluar las características estructurales del basamento, tomar muestras para análisis textural y practicar pruebas de infiltración. En total se realizaron 32 análisis texturales de suelos y se practicaron 30 pruebas de infiltración (Tabla 2, Fig.3).

Tabla 2. Resultados de los análisis texturales y las pruebas de infiltración.

Código punto	Coordenadas		Tasa infiltración (mm/h)	Granulometría - Textura (%)		
	Este (m)	Norte (m)		Arena	Limo	Arcilla
1	1042975	1328990	300.0	25	61	14
2	1051404	1330163	45.0	87	6	6
3	1054900	1337651	90.0	94	3	3
4	1049365	1333835	36.0	36	43	21
5	1052520	1336302	240.0	89	5	5
6	1039551	1337119	82.6	3	74	23
7	1046887	1338760	12.0	33	49	18
7A	1047382	1337308	7.7	23	38	38
8	1048180	1341745	300.0	92	4	4
9	1033020	1344143	46.5	5	52	43
10	1046337	1345552	150.0	94	5	1
11	1059459	1346569	--	20	40	40
11A	1058292	1347624	--	13	75	12
12	1037657	1348230	1.2	11	63	26
13	1028493	1350601	73.7	7	62	31
14	1052528	1351055	30.0	90	7	2
16	1035079	1353364	120.0	19	53	28
17	1062735	1352959	7.5	41	39	20
18	1048057	1356993	7.5	20	60	20
19	1052926	1354837	15.0	--	--	--
20	1041195	1356159	1.5	20	53	27
21	1047114	1356690	19.7	27	56	17
22	1035169	1359444	10.1	2	39	59
23	1049867	1366530	62.1	19	61	20
24	1040454	1369405	2.5	9	63	28
25	1045453	1369311	31.3	15	57	28
26	1054748	1369967	15.0	53	32	14
27	1051443	1374501	120.0	--	--	--
28	1044413	1375035	1.9	11	66	23
29	1049971	1375175	15.0	23	61	16
30	1049456	1381515	60.0	95	3	1
31	1045261	1381670	7.5	--	--	--
32	1040847	1385709	8.5	31	50	19
34	1042860	1390492	6.0	8	66	26

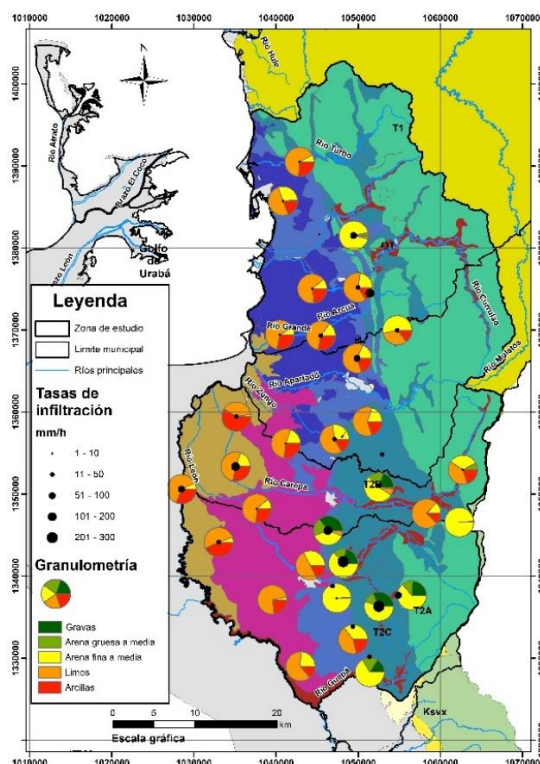


Fig. 3. Distribución espacial de análisis texturales y pruebas de infiltración. Mapa base [25].

Luego de practicar los ejercicios de modelación espacial, según las metodologías a las que se hace referencia en la Tabla 1, se exploraron resultados a la luz del MHC para decidir cuál era el método más apropiado para la región de estudio. Como conclusión se optó por ajustar y luego aplicar la metodología propuesta, en Colombia, por Escobar et al.,[16] y Betancur et al.,[15].

Los parámetros que se consideran dentro de esta metodología son: topografía, patrones estructurales, patrones texturales del suelo, capacidad de infiltración y presencia de manantiales. A cada variable se le asigna una calificación entre 1 y 5 en virtud de que favorezcan en mayor o menor medida la recarga de los acuíferos. La categorización de las zonas de recarga se hace a partir de la suma ponderada de los parámetros, los cuales tienen pesos diferentes definidos a partir de un proceso analítico jerárquico [26], soportado en juicio de expertos. La función de análisis espacial tiene la forma de la Ecuación 1.

$$IFR = 0.26(T) + 0.23(E) + 0.21(PT) + 0.19(I) + 0.11(M) \quad (1)$$

Donde,

IFR: Índice de función de recarga

T: Calificación asignada según topografía

E: Calificación asignada según análisis estructural

PT: Calificación asignada según patrón Textural

I: Calificación asignada según tasa de infiltración

M: Calificación asignada según ocurrencia de manantiales

El IFR tomará valores entre 1 y 5 (tabla 3), según los cuales se definen las zonas de recarga directa e indirecta, asignándoles a estas últimas una condición jerárquica de mayor o menor importancia.

Tabla 3. Clasificación de las zonas de recarga según valores de IFR

Rango	Calificación	Categorización
1-2	1	Importancia muy baja
2-3	2	Importancia Baja
3-4	3	Importancia Media
4-5	4	Importancia Alta
-	5	Directa

3. RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados de aplicar la metodología para categorizar las zonas de recarga del acuífero libre y del acuífero confinado multicapa de Urabá, explicando los ajustes practicados a la propuesta de Betancur et al.,[15] y Escobar et al.,[16]. Inicialmente se presenta la descripción de cada variable empleada, luego la descripción de los resultados obtenidos en la delimitación de las zonas de recarga para el acuífero confinado multicapa y finalmente para el acuífero libre.

3.1. Variables espaciales

Para la determinación de las llamadas zonas de recarga indirecta, que aportarían flujos desde otras unidades hidrogeológicas al acuífero confinado, se evaluaron y calificaron las variables: topografía, texturas, infiltración, estructuras y manantiales.

Para determinar la calificación dada a partir de la clasificación de las condiciones topográficas de la zona de estudio, fue utilizado un modelo digital del terreno (DEM) con resolución de 12,5 m, obtenido del satélite ALOS, el cual colecta imágenes terrestres a través de su sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar) [27], este DEM ha sido corregido para el departamento de Antioquia por la Gobernación de Antioquia. Los resultados se presentan en la Fig.4. Se puede apreciar que la mayor parte de la zona de estudio tiene asignada

clasificación de 5, esto era de esperarse considerando que la subregión se caracteriza por poseer una topografía plana en el mayor porcentaje del territorio, con zonas que propician el almacenamiento temporal del agua en superficie posibilitando la posterior infiltración.

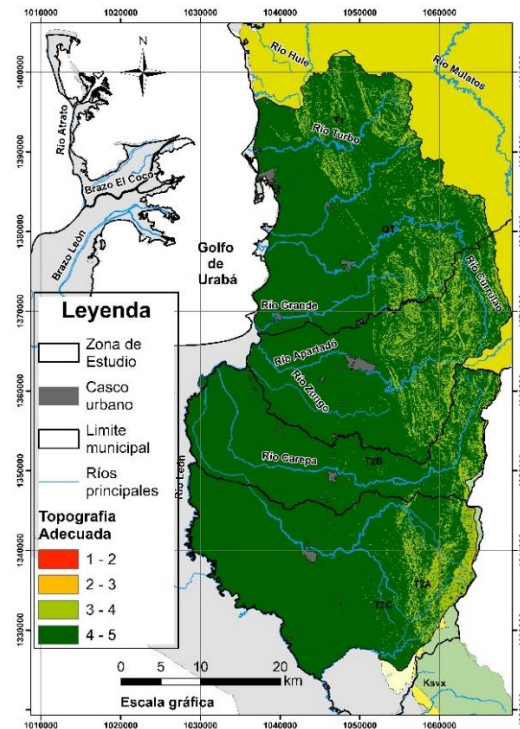


Fig. 4. Pesos asignados a la variable topografía

Las condiciones texturales se calificaron a partir de la clara correspondencia entre las unidades de suelo y las granulometrías obtenidas a partir de los resultados de las 32 pruebas granulométricas realizadas en la zona (Tabla 2). La distribución espacial de las calificaciones para esta variable se observa en la Fig. 5. Es clara la predominancia de la calificación 2; mientras que, las zonas con calificación 5 se asocian a los suelos de texturas gruesas localizados en las estribaciones de la Serranía de Abibe.

La relación entre los resultados de las 30 pruebas de infiltración (Tabla 2) y las condiciones de tipo de suelo y la correlación hidroestratigráfica en los niveles superiores, permitió la elaboración del mapa de infiltración que se presenta en la Fig.6, con calificaciones 1, 3, 4 y 5.

En la propuesta metodológica inicial, la evaluación del factor estructuras contempla condiciones de fracturamiento y diaclasamiento, incluyendo dirección, buzamiento, densidad y apertura. Estas propiedades, comunes en rocas duras (ígneas y metamórficas), tienen una expresión diferente en las rocas blandas (sedimentarias clásticas) y están ausentes en los materiales no consolidados. Estas razones llevaron a realizar un ajuste metodológico, soportado en las observaciones de campo: i) asociado a las trazas de las fallas en la región se tuvo en cuenta la pérdida de consolidación de las rocas sedimentarias, definiéndose una franja de 500m a la que se le asigna una calificación de 4, ii) en las vertientes de la serranía donde la roca mantiene su textura o ha desarrollado perfiles de meteorización limo-arcillosos se asigna una calificación de 1, y iii) a la superficie correspondiente al acuífero libre y la subyacente capa de arcilla que confina al acuífero multicapa también se le asignó la calificación de 1. En la Fig.7 se representa el resultado de aplicar estas consideraciones.

Finalmente, en relación con los manantiales, se mantuvo la recomendación dada en la metodología, según la cual, dado que no existe un inventario de ellos, la calificación regional es 3.

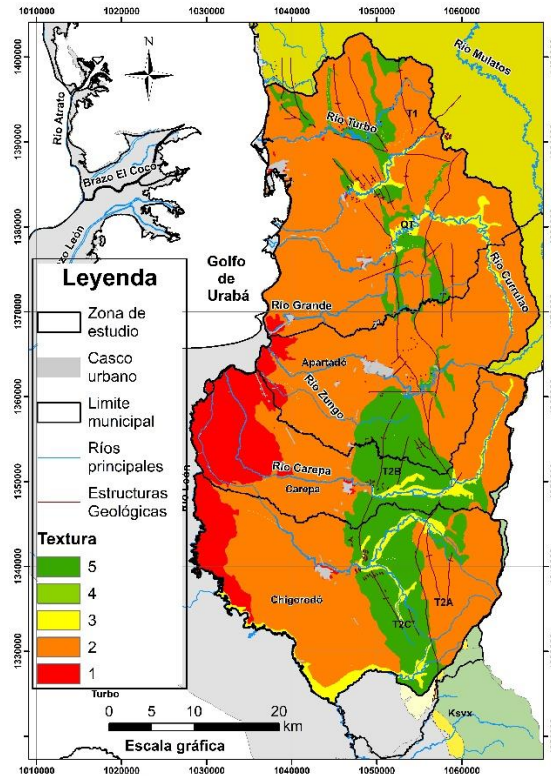


Fig.5. Pesos asignados a la variable textura.

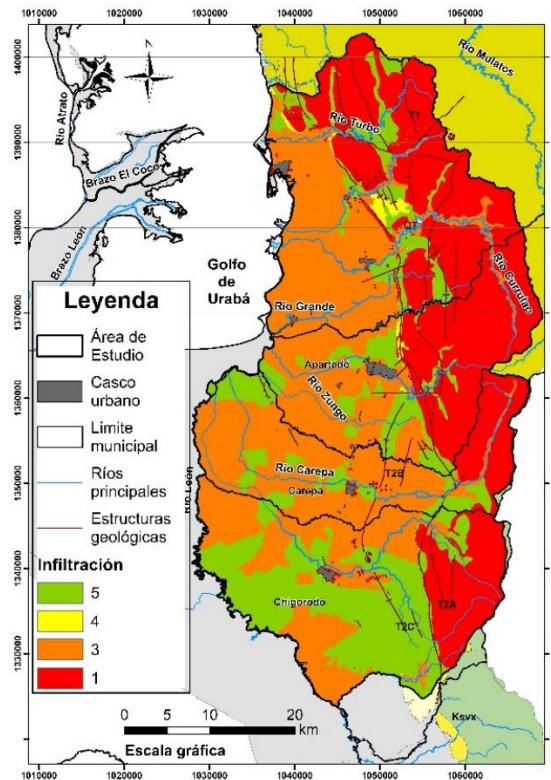


Fig. 6. Pesos asignados a la variable infiltración.

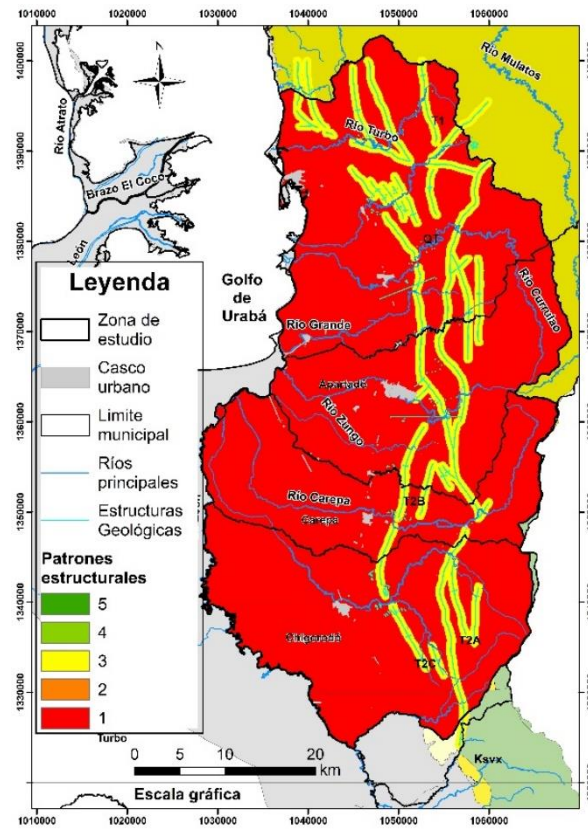


Fig.7. Pesos asignados a la variable estructuras.

Para las zonas de recarga directa se ha determinado asignar la calificación de 5 [15] [16]; esto incluiría tanto las zonas puntuales donde aflora el acuífero confinado y la extensión en la que se expone el acuífero libre. Sin embargo, es claro que todas las zonas de recarga directa en cualquier área de estudio no presentan condiciones homogéneas de textura e infiltración (tampoco de uso), por esa razón se considera, pensando en la función de la recarga, establecer al menos dos categorías de zonas de recarga directa: una de mayor importancia, para los suelos más permeables y otra de menor importancia cuando la permeabilidad es baja a muy baja (tasas de infiltración lenta a muy lenta). Estas consideraciones son coherentes con varias discusiones que a nivel científico [28] y de gestión ambiental de las zonas estratégicas en términos de aguas subterráneas se viene dando en los últimos años.

3.2. Zonas de recarga del acuífero confinado multicapa

Inicialmente fueron identificadas las zonas donde los niveles profundos (acuífero confinado multicapa) afloran, estas se calificaron como zonas de recarga directa, con buena permeabilidad: 5. La extensión restante entra en las categorías de zonas de recarga indirecta (Tabla 3). Este resultado se presenta en la figura Fig.8.

Las zonas de recarga indirecta de importancia alta están asociadas principalmente a: las franjas de fracturamiento de las líneas de falla y plegamientos (sinclinales y anticlinales) y a los suelos con textura gruesa. Las zonas de recarga indirecta de importancia media se localizan principalmente en las estribaciones de la Serranía de Abibe y hacia el costado sur oriental de la zona de estudio, estas están asociadas principalmente a los suelos con texturas gruesas tipo arenas y gravas y a zonas de baja pendiente. El resto del territorio constituye zona de recarga indirecta de importancia baja; dentro de ella se clasifica toda el área suprayacida por los niveles menos permeables del acuífero libre y las vertientes más altas de la Serranía.

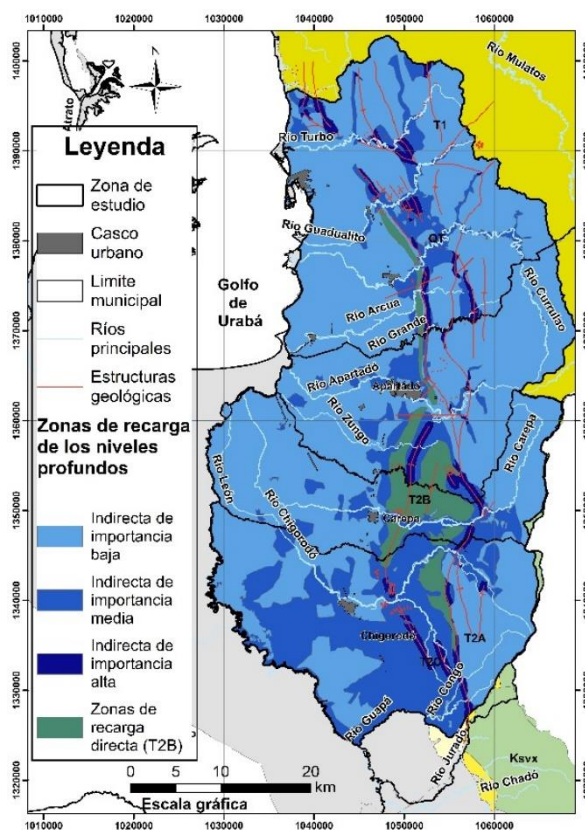


Fig.8. Mapas de zonas de recarga regional.

3.3. Zonas de recarga del acuífero libre

Se construyó el mapa de zonas de recarga para los niveles someros del sistema acuífero (acuífero libre) y se realizó su priorización, teniendo en cuenta las consideraciones especiales descritas en el numeral 3.1, así se definieron las zonas de recarga directa de mayor y menor importancia que se presentan en la Fig.9. Las condiciones más favorables se presentan al sur y centro de la zona de estudio.

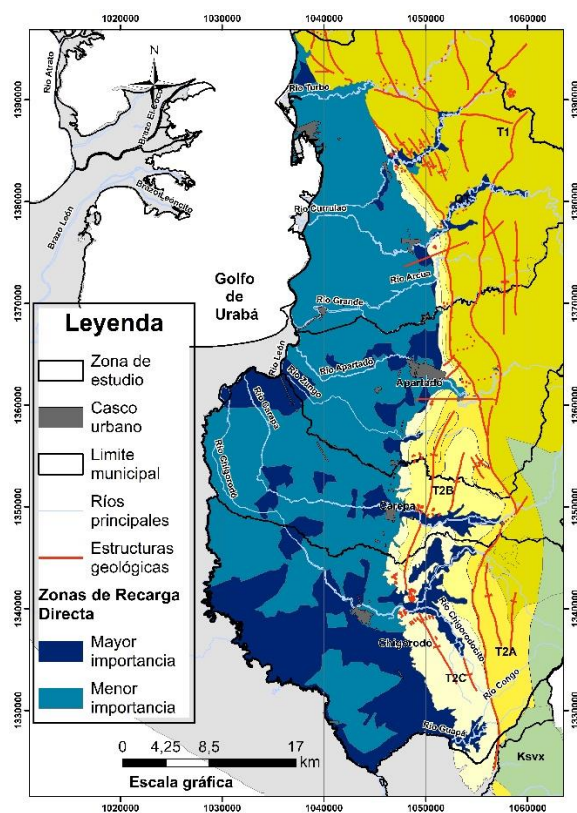


Fig.9. Zonas de recarga directa.

4. DISCUSIÓN

Las zonas de recarga de acuíferos son áreas de especial interés hidrogeológico y objeto de protección especial [29], de ahí la importancia de su delimitación. Muchos sistemas hidrogeológicos están constituidos por una superposición hidroestratigráfica de acuíferos libres, acuitardos y acuíferos confinados, en circunstancias como estas la definición de los modos de ingreso de agua a cada nivel involucra además de la precipitación fuentes y áreas que configuran flujos entre distintas unidades [1]. Sin embargo, los métodos de delimitación de zonas de recarga rara vez se ocupan de esta complejidad.

Se encuentran en la literatura varias metodologías, apoyadas normalmente en trabajos de modelación espacial con capas temáticas que tienen en cuenta diferentes parámetros [28], en todo caso es importante definir procedimientos que permitan calificar cada capa teniendo en cuenta la integridad de las condiciones geológicas posibles en una región, en la que se pueden presentar rocas duras - con o sin alteración- (ígneas y metamórficas), rocas blandas (sedimentarias clásticas) y depósitos no consolidados [30] [31] [31]. En cada caso las características estructurales tienen manifestaciones diferentes que deben ser tenidas en cuenta al definir su peso en la recarga y en el flujo subterráneo.

La superposición estratigráfica de acuíferos, separados por capas de baja permeabilidad introduce en los modelos de recarga una posible conexión vertical, referida a flujos como el goteo, que podrían llevar a considerar a los acuíferos de los niveles superiores como áreas de recarga hacia los niveles más profundos, con incidencia mayor o menor según los valores de conductividad vertical y características estructurales [33] [34] [33].

De otro lado, en relación a la recarga directa y difusa, que caracteriza a los acuíferos libres, las condiciones de textura y tasas de infiltración determinan magnitudes diferenciales en la función de la recarga. Establecer estas diferencias puede jugar un papel fundamental para armonizar planes de manejo de zonas de recarga con planes de ordenamiento territorial [36] [37] [38].

Aun cuando no es el propósito de este estudio, vale la pena señalar que en muchos escenarios, por ejemplo en aquellas zonas donde el agua subterránea está siendo objeto de minería del agua, comprometiéndose las reservas, la delimitación de las zonas de recarga de un acuífero puede conllevar a la identificación de lugares factibles para la implementación de técnicas de recarga artificial (MAR), que disminuyen el descenso del nivel piezométrico en el acuífero y aumenta la escorrentía subterránea, lo que permite tener mayor disponibilidad de agua para diversos fines (especialmente en verano), en algunos casos puede incluso mejorar la calidad del agua subterránea [39].

Para la determinación de las zonas de recarga del acuífero libre y del acuífero confinado del Eje Bananero de Urabá, se tuvieron en cuenta estas consideraciones, producto de ello se establecen algunos elementos para ajustar la metodología de Escobar et al.,[16], lográndose con ello un mayor ámbito de aplicación. En resumen, estas modificaciones sugieren: i) establecer una escala de calificación para evaluar el factor estructural en rocas blandas y depósitos no consolidados y ii) establecer categorías de importancia, basados en propiedades texturales y tasas de infiltración para las zonas de recarga directa difusa en acuíferos libres. En una próxima aplicación se podría reescalar la función IFR, excluyendo el factor manantiales, esto en consideración a que en la misma metodología se sugiere, en la mayoría de los casos, asignar una calificación constante de 3.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de revisar y evaluar varias propuestas metodológicas, se definieron los criterios que podrían aplicarse a la delimitación del caso de estudio: Acuífero del Golfo de Urabá. De esa manera se realizaron ajustes a la metodología propuesta por Betancur et al.,[15] y Escobar et al.,[16] relacionados con: i) la calificación de las variables estructuras y manantiales y ii) estableciendo criterios para jerarquizar zonas de recarga directa de mayor o menor importancia.

Los ajustes metodológicos realizados a la propuesta de Escobar et al.,[16], para la delimitación de zonas de recarga, fueron aplicados en sistema acuífero del Eje Bananero de Urabá para obtener los mapas de delimitación de las zonas de recarga del sistema acuífero del Eje Bananero del Urabá Antioqueño.

En la región de Urabá se definieron categorías de recarga para el acuífero libre, según variaciones texturales en la zona de recarga difusa. Para el sistema confinado multicapa se delimitaron áreas de recarga teniendo en cuenta flujos regionales y posibles goteos desde unidades suprayacentes.

Las zonas de recarga indirecta del acuífero confinado multicapa presenta tres tipos de categorías: importancia baja, media y alta, esta última asociada a suelos de textura gruesa y al fracturamiento de líneas de falla y plegamientos. Las zonas de recarga directa para este acuífero son aquellas donde las capas más permeables de la Formación Corpa afloran en superficie.

Se definieron para el acuífero libre zonas de recarga directa de mayor y menor importancia, en las cuales que las condiciones más favorables para la recarga se presentan al sur y centro de la zona de estudio.

Es necesario que el país concluya el proceso que viene adelantando con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Asuntos Ambientales y el Servicio Geológico Colombiano, para estandarizar y adoptar una guía metodológica nacional para la delimitación y priorización de zonas de recarga; guía que pueda aplicarse ampliamente, aún en condiciones donde no se tiene un modelo de detalle.

La delimitación y categorización de las áreas de recarga en el sistema acuífero de la región de Urabá brinda, a CORPOURABA; elementos fundamentales para establecer determinantes ambientales para el ordenamiento territorial regional.

La ruta metodológica aplicada al sistema hidrogeológico del Golfo de Urabá, puede adaptarse para su implementación a cualquier acuífero y llegar con ello a la definición de medidas de manejo técnicas, administrativas y normativas para el manejo y protección de las zonas de recarga.

6. AGRADECIMIENTOS

A la Corporación para el desarrollo Sostenible del Urabá, CORPOURABA, que en marco del convenio de cooperación -200-10-01-02-0148-2017- con la Universidad de Antioquia realizó el proyecto Delimitación de las zonas de recarga del sistema acuífero.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Custodio, E. Recarga natural a los acuíferos, metodología y soporte de la isotopía del agua. Aplicación a la planificación hidrológica y conocimiento de las aguas subterráneas en España. Informe RAEMIAISBN 978-84-9880-814-8. España. 1205, 2019.

[2] Thornthwaite, C. W. The water balance Publications in Climatology, 8(1), 1–104, 1955.

[3] Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. Publications in Climatology, 10, 185-311, 1957.

[4] Bastidas, B., Betancur, T., & Campillo, A. Analysis of water table fluctuations to improve understanding and quantification of the groundwater recharge process in the shallow aquifer of the gulf of Urabá (COLOMBIA). E-Proceedings of the 38th IAHR World Congress. Panama, 2019

[5] Dripps, W. R. The spatial and temporal variability of groundwater recharge within the Trout Lake basin of northern Wisconsin, University of Wisconsin, 2003.

[6] Dripps, W. R., & Bradbury, K. R. A simple daily soil-water balance model for estimating the spatial and temporal distribution of groundwater recharge in temperate humid areas, Hydrogeology Journal, <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0160-6>, 15(3), 433–444, 2007.

[7] Zomlot, Z., Verbeiren, B., Hysman, M., Batelaan, O. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: assessment of controlling factors. «in review». Journal of Hydrology, Regional Studies, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.005>, 4, 349-368, 2015.

[8] Tóth, J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. Journal of Geophysical Research, <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>, 68, 4795-4812.1963.

[9] Jiang, X. W., Wan, L., Wang, X. S., Wang, D., Wang, H., Wang, J. Z., Zhao, K. Y. A multi-method study of regional groundwater circulation in the Ordos Plateau, NW China. Hydrogeology Journal, <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1731-4>, 26(5), 1657-1668, 2018.

[10] Carrillo, J. J., & Cardona, A. Groundwater flow systems and their response to Climate change: A need for a water-system view approach. American Journal of Environmental Sciences. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2012.220.235>, 8(3), 220-235, 2012.

[11] Chachadi, A. G. New Indicator Based Method SALDIT for Delineation of Natural Groundwater Recharge Areas. ScienceDirect, 649 - 659, 2015.

[12] Arévalo, L. Peñuela, y Carrillo, J. Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. <https://doi.org/10.14350/rig.30518>, 81 (81), 18-32, 2013

[13] Deepa, S., S. Venkateswaran, R. Ayyandurai, R. Kannan, y M. Vijay Prabhu. Groundwater recharge potential zones mapping in upper Manimuktha Sub basin Vellar river Tamil Nadu India using GIS and remote sensing techniques». Modeling Earth Systems and Environment, <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0192-9>, 2(3), 137, 2016.

[14] Yeh HF, Cheng YS, Lin HI, Lee CH. Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian river, Taiwan. Sustain Environ Res 26, 33-43, 2016.

[15] Betancur, T., Duque, C., Martínez, C., García, D., Villegas, P., et al. Aplicación de una metodología para la delimitación de zonas potenciales de recarga. caso de estudio: Eje Bananero del Urabá Antioqueño-Colombia. Hidrogeología Regional Volumen I en memorias, XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología. Salta, Argentina, 183-189, 2018.

- [16] Escobar, J., Betancur, T., Palacio, P., & Martínez, C. Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos, *Revista Politécnica*, 13(24), 37-48, 2017.
- [17] IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua, Instituto de Hidrología, Meteorología y Asuntos Ambientales - IDEAM-, Bogotá, Colombia, 452, 2018.
- [18] INGEOMINAS. Evaluación de las aguas subterráneas de Urabá, Bogotá D.C, 316, 1995.
- [19] Gobernación de Antioquia. El Urabá antioqueño: un mar de oportunidades y potencialidades Perfil subregional, 2012.
- [20] Gobernación de Antioquia Universidad Nacional de Colombia, & UPRA. Plan de Ordenamiento Territorial Agropecuario para Antioquia (POTA), 2018.
- [21] AUGURA, A. de B. de C. Coyuntura BANANERA 2017. Medellín Colombia, 2017.
- [22] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Antioquia. Evaluaciones Agropecuarias por Concenso, Medellín, 2017.
- [23] Universidad de Antioquia y CORPOURABA. Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del golfo de Urabá, Apartadó, 2016.
- [24] Universidad de Antioquia y CORPOURABA. Delimitación de las zonas de recarga del sistema acuífero y fortalecimiento de la mesa de trabajo –MACURA-, Apartadó, 331, 2018.
- [25] IGAC & GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia-CD, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007
- [26] Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 2, 83-98, 2000.
- [27] ASF DAAC. ALOS PASAR Radiometric Terrain Corrected high res, JAXA/METI, accessed 11 November 2015, <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>, 2015.
- [28] Agarwal, R. & Garg, P. K. Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential & Recharge Zones Mapping Using Multicriteria Decision Making Technique. *Water Resources Management*, 243-260, 2016.
- [29] MADS. Decreto 1076 de 2015, compendio de la normatividad ambiental en Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS-, 2015.
- [30] Lentswe, G. B., Molwalefhe, L. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100674>, 28, 1-22, 2020.
- [31] Das, B., Pal, S. C. Combination of GIS and fuzzy-AHP for delineating groundwater recharge potential zones in the critical Goghat-II block of West Bengal, India. *HydroResearch*, <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.10.001>, 2, 21-30, 2019.
- [32] Chatterjee, R. S., Pranjali, P., Jally, S., Kumar, B., Dadhwal, V. K., Srivastav, S. K., Kumar, D. Potential groundwater recharge in north-western India vs spaceborne GRACE gravity anomaly based monsoonal groundwater storage change for evaluation of groundwater potential and sustainability. *Groundwater for Sustainable Development*, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100307>, 10, 2-14, 2020.
- [33] Yeh, HD., Chang, CM. Two-dimensional stochastic analysis of flow in leaky confined aquifers subject to spatial and periodic leakage. *Advances in Water Resources*, doi:10.1016/j.advwatres.2009.08.004, 32, 1601–1608, 2009.
- [34] Schyff, M. D., Kanyerere, T., Israel, S., Vermaak, N. Using multiple tracers and geological techniques to determine the connectivity between aquifer systems, West Coast, South Africa. *Journal Pre-proof*, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102863>, 2020.
- [35] Feng, Q., Zhan, H. On the aquitard–aquifer interface flow and the drawdown sensitivity with a partially penetrating pumping well in an anisotropic leaky confined aquifer. *Journal of Hydrology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.058>, 521, 74-83, 2015.

-
- [36] Pourghasemi, H. R., Sadhasivam, N., Yousefi, S., Tavangar, S., Nazarlou, H. G., Santosh, M. Using machine learning algorithms to map the groundwater recharge potential zones. *Journal of Environmental Management*, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110525>, 265, 1-17, 2020.
- [37] Arshad, A., Zhang, Z., Zhang, W., Dilawar, A. Mapping favorable groundwater potential recharge zones using a GIS-based analytical hierarchical process and probability frequency ratio model: A case study from an agro-urban region of Pakistan. *Geoscience Frontiers*, in press <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.013>, 2019
- [38] Zhenga, W., Wang, S., Sprenger M., Liua, B., Caoa, J. Response of soil water movement and groundwater recharge to extreme precipitation in a headwater catchment in the North China Plain. *Journal of Hydrology*, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.071>, 576, 466-477, 2019.
- [39] De Giglio, O., Caggiano, G., Apollonio, F., Marzella, A., Brigida, S., Ranieri, E., ... Montagna, M. T. The aquifer recharge: An overview of the legislative and planning aspect. *Annali di Igiene*, <https://doi.org/10.7416/ai.2018.2193>, 30(1), 34-43, 2018.