

ANÁLISIS JERÁRQUICO PONDERADO APLICADO A LA IDENTIFICACIÓN DE RECARGA Y FLUJOS REGIONALES EN ACUÍFEROS

John Escobar¹, Teresita Betancur^{2*}, Edwin García^{3*}, Cristina Martínez⁴, Paola Palacio⁵

¹ Doctor en Ingeniería, Rector Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. john.escobar@udea.edu.co

² Doctora en Ingeniería, E-mail: teresita.betancur@udea.edu.co

³ Doctor en Ingeniería, E-mail: edwin.garcia@udea.edu.co

⁴ Magister Geotecnia, Grupo GIGA Universidad de Antioquia. E-mail: crismurb@yahoo.com

⁵ Doctora en Ingeniería, Grupo GIGA Universidad de Antioquia. E-mail: papabu2@yahoo.es

* Profesor Universidad de Antioquia

RESUMEN

La evaluación de fenómenos espaciales es intrínsecamente un proceso de toma de decisiones. Un caso particular de estos fenómenos son las zonas de recarga asociadas a sistemas de flujo regional, ya que en su determinación y zonificación se intentan identificar, jerarquizar y ponderar una serie de características que involucran variables cuantitativas y cualitativas distribuidas en forma heterogénea en el espacio geográfico. Si bien existen múltiples métodos para abordar la toma de decisiones con variables espaciales, en ellos sobresalen los métodos de Análisis Jerárquico Ponderado (AJP), que integran aspectos cualitativos y cuantitativos en un proceso único de decisión, en el que es posible incorporar simultáneamente valores personales (derivados de la experiencia) y del pensamiento lógico-matemático (derivados del conocimiento) en una estructura única de análisis.

Este trabajo expone una metodología para la aplicación del proceso AJP en la determinación de las zonas de recarga y flujos regionales y su aplicación para un sistema acuífero ubicado en el Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia).

Palabras clave: Aguas subterráneas, Variables espaciales, Manejo de la recarga de acuíferos

Recibido: 22 de septiembre de 2016

Received: September 22th, 2016

Aceptado: 29 de Marzo de 2017

Accepted: March 29th, 2017

THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS APPLIED TO IDENTIFICATION OF AREAS GROUNDWATER RECHARGE

ABSTRACT

The assessment of spatial phenomena is inherently a process of decision making. A particular case of these phenomena are recharge areas associated with regional flow systems, since in its determination and zoning it is attempted to identify, to prioritize and to assign weight to any features that involve quantitative and qualitative variables heterogeneously distributed in a geographic space. Although there are many methods to address decisions making with spatial variables; among these methods, the Analytic Hierarchy Process (AHP) because it integrate qualitative and quantitative aspects in a single decision process, in which it is possible simultaneously incorporate personal values (from experience) and logical-mathematical thought (derived of knowledge) in a single structure analysis.

This paper presents a methodology for the implementation of Hierarchical Analysis Process weighted in determining recharge areas, regional flow and its application for an aquifer system located in the Valley of Aburrá (Antioquia, Colombia).

Keywords: Groundwater, Spatial variables, Management aquifer recharge.

Cómo citar este artículo: J. Escobar, T. Betancur, E. García, C. Martínez, P. Palacio, "Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos," *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 24, pp. 37-48, 2017.

1. INTRODUCCIÓN

Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación, mediante modelos geoespaciales, de las características y propiedades de un sistema en el que se combinan los componentes hidrológico y geológico del medio natural. En él se explica la dinámica del ciclo hidrológico involucrando las formaciones geológicas de los niveles superiores de la corteza terrestre. El modelo hidrogeológico conceptual se obtiene a partir de la exploración y comprende varios elementos: i) la geometría de las unidades hidroestratigráficas (acuíferos, acuícludos, acuífugos y acuíardos); ii) las áreas, fuentes y magnitud de la recarga; iii) las superficies piezométricas; iv) las propiedades hidráulicas (conductividad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento) de las distintas unidades y v) la caracterización hidrogeoquímica e isotópica del sistema.

Existen métodos estándar y a ellos se suman cada vez más y mejores técnicas analíticas mediante los cuales los modelos se refinan y se ajustan. El conocimiento de los sistemas hidrogeológicos cada vez es más necesario, ya que además de que el agua subterránea ha sido siempre una importante fuente de abastecimiento, se perfila cada vez más como una fuente alternativa y complementaria frente a los retos de adaptación ante el cambio ambiental [1].

La temática asociada al entendimiento y manejo de la recarga de acuíferos ha constituido en las últimas décadas una línea emergente de trabajo [2] y dentro de ella es necesario hacer referencia a la delimitación de las áreas y las fuentes a través de las cuales ingresa agua al sistema subterráneo, en aras no solo de su protección sino también con el propósito de identificar zonas para la eventual ubicación de dispositivos que induzcan la recarga de sistemas vulnerables al agotamiento.

El ingreso de agua a los sistemas hidrogeológicos y dentro de ellos particularmente a los acuíferos, es condicionado por una serie de variables físicas del medio. De otro lado, la identificación y la determinación de la importancia relativa de los distintos factores que pueden incidir en la recarga se puede evaluar mediante la aplicación de técnicas de decisión multicriterio, apoyados en juicios de expertos y soportadas en evaluaciones cuantitativas.

En este artículo se plantea una metodología para realizar la delimitación de zonas de recarga y sistemas regionales de flujo a un acuífero y se presenta el resultado de su aplicación a un caso de estudio en el Valle de Aburrá –Colombia-.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Delimitación de Zonas de Recarga

Tal y como está establecido en el ciclo hidrológico, el agua que precipita en una región, puede tomar varias rutas según las cuales podría regresar a la atmósfera como evapotranspiración, o podría fluir directamente sobre la superficie del terreno, como escorrentía superficial directa. También podría almacenarse temporalmente, en depresiones del terreno, o infiltrarse, constituyendo estas dos opciones posibles fuentes de recarga. En las áreas donde los acuíferos afloran en superficie es propicia la recarga directa, ella ocurre a tasas variables dependiendo de las condiciones texturales de la zona no saturada. Las características topográficas del terreno representan el primer factor determinante, para favorecer o no la escorrentía superficial; solo en aquellas áreas donde se registren paisajes planos, suaves u ondulados, puede ocurrir el almacenamiento o retención en superficie, que posibilite luego la infiltración; sin embargo para que se dé este proceso, es preciso que el suelo posea ciertas condiciones de permeabilidad, según las cuales los grados de humedad del suelo, permiten alcanzar dimensiones propicias para el flujo de agua a través de él [3].

La permeabilidad secundaria en rocas duras, se adquiere mediante procesos de meteorización física y química, que pueden convertir los saprolitos en suelos, o que pueden configurar rutas preferenciales para el movimiento de fluidos según disposición, apertura y densidad de las diaclasas. Así, el agua que se almacena y fluye por un acuífero, puede provenir de la recarga directa a partir de los excedentes de la precipitación local, igualmente puede provenir de interacciones con cuerpos de agua superficial o puede involucrar flujos regionales, que en ocasiones llegarían a representar largas distancias y prolongados tiempos de recorrido (figura 1), en la práctica estos se constituyen en recarga.

Los factores que condicionan la recarga de un sistema acuífero son la distribución espacial de las

unidades hidrogeológicas, las características geomorfológicas que posee el paisaje, los rasgos estructurales de las rocas que rodean a los acuíferos, el tipo de cobertura, la hidrografía, las características hidráulicas de los suelos y las condiciones hidrometeorológicas. De acuerdo con la conceptualización general al respecto, algunos factores antrópicos pueden constituir también fuentes de recarga, estos son: los retornos por riego y las fugas en redes de acueducto y alcantarillado.

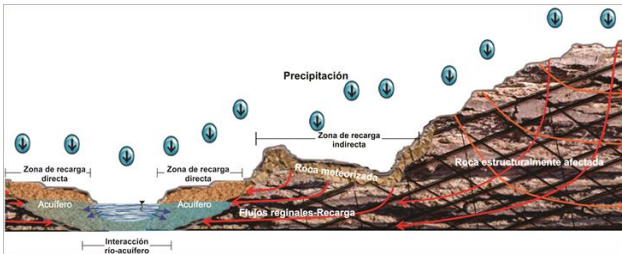


Fig. 1. Esquema pictórico sobre los procesos que intervienen en la recarga

En las áreas donde los acuíferos afloran en superficie, es propicia la recarga directa, ella ocurre a tasas variables dependiendo de las condiciones texturales de la zona no saturada. El mapa de unidades hidrogeológicas permite ubicar los acuíferos, y para ellos, las áreas donde afloran y no han sido impermeabilizados en su superficie por acción de los procesos de urbanización, esas zonas constituyen las áreas de recarga directa. La recarga directa se puede evaluar mediante procedimientos de balance hídrico por unidad de suelo, que permite, para la escala temporal diaria, estimar valores de recarga por exceso de precipitación, sin consideración de los fenómenos locales de intercambio hídrico con las corrientes, ni la dinámica horizontal de los flujos superficiales y subsuperficiales. El método emplea además las coberturas vegetales, las características texturales y de infiltración de los suelos.

Según variaciones piezométricas, puede presentarse puntual y temporalmente aportes de agua al acuífero, desde corrientes o cuerpos de agua.

Las características topográficas del terreno representan el primer factor determinante para favorecer o no la escorrentía superficial, la pendiente y los cambios que se presenten en esta, permiten además identificar aquellas zonas donde,

de acuerdo a la inclinación del terreno, se favorece la infiltración; las áreas más favorables son aquellas donde se registren paisajes planos, suaves u ondulados, que posibilitan el almacenamiento o retención en superficie, lo que facilita la infiltración. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, para que se de este proceso es preciso que el suelo posea las condiciones de permeabilidad y humedad propicias para el flujo de agua a través de él. Los procesos de meteorización, tanto física como química posibilitan la saprolitización de las unidades de roca, generando perfiles de meteorización que pueden favorecer el flujo de agua a través de ellas. Estructuras como las diaclasas, pueden configurar rutas preferenciales para el movimiento de fluidos según su disposición, apertura y densidad

Bajo estas premisas, y recopilando este conjunto de ideas en el diagrama de la figura 2 se resumen los elementos o actividades a considerar para la determinación de las zonas de recarga [4] [5].

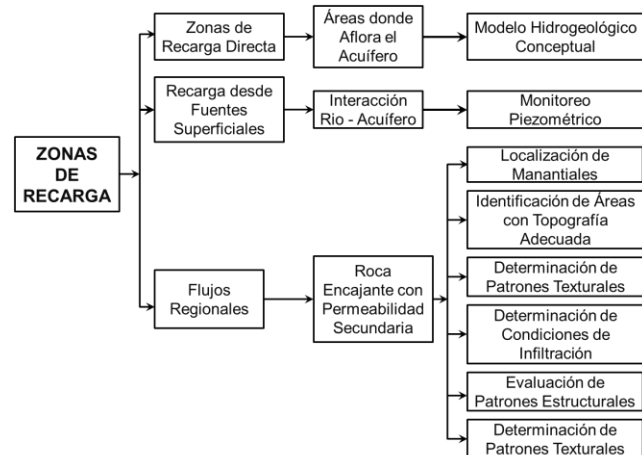


Fig. 2 Elementos a considerar para la determinación de zonas de recarga directa, indirecta y flujos regionales [6].

Los flujos regionales involucran normalmente rocas encajantes del sistema acuífero, que han adquirido condiciones de porosidad y permeabilidad secundaria. Para identificar las zonas que adquieren esta condición de área de recarga-descarga se realiza el análisis cruzado de una serie de características de las unidades hidrogeológicas que sirven de basamento a los embalses subterráneos:

- Localización de manantiales: Siendo los manantiales puntos en los cuales el agua subterránea aflora de manera natural, su presencia y las posibilidades de aforar en ellos el caudal y de tomar muestras de agua, los convierte en fuentes de información indicadora de las rutas de tránsito y descarga del agua subterránea.
- Determinación de patrones texturales: La evaluación de las propiedades texturales de la zona no saturada, característica que se hereda de la roca madre de acuerdo con los procesos de meteorización física y química que ella haya sufrido, arroja elementos de juicio para estimar la dimensión que puede cobrar el flujo vertical de agua a través de ellos como potencial contribución a la recarga.
- Identificación de áreas con topografía adecuada: Los mapas de pendientes y la evaluación de los cambios que se presentan en las mismas, permiten identificar las zonas donde de acuerdo al grado de inclinación de las laderas, se favorece la infiltración del agua.
- Evaluación de patrones estructurales: Identificar familias y patrones de diaclasamiento permite establecer la posibilidad del flujo regional hacia las unidades acuíferas, según direcciones y ángulos de buzamiento de las estructuras, densidad de diaclasamiento, apertura de fracturas y características de rugosidad de los planos.
- Determinación de condiciones de infiltración: En las zonas donde se cumplan condiciones de topografía adecuada, perfiles de meteorización y patrones estructurales propicios para la infiltración, se practican pruebas de infiltración para evaluar condiciones de permeabilidad.
- Análisis hidrogeoquímico e isotópico: La hidrogeoquímica y la isotopía permiten realizar una evaluación de la evolución del agua a través de las formaciones geológicas y constituyen metodologías para la verificación de fuentes y rutas del agua.

2.2 Proceso Analítico Jerárquico.

Las Técnicas de Decisión Multicriterio son el conjunto de herramientas y procedimientos utilizados en la resolución de problemas en los que intervienen diferentes criterios, generalmente en conflicto. En este campo se reconocen tres tendencias, a saber: La Teoría de Utilidad Multiatributo [7], el proceso Analítico Jerárquico

(AHP de su sigla en inglés) [8] y las técnicas de superación “outrankings” [9] [10].

La técnica AHP permite modelar el problema a través de una estructura jerárquica, usando una escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, de este modo combina las escalas correspondientes a los diferentes criterios, sintetiza los juicios emitidos y entrega un ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos (prioridades).

De esta manera el Proceso de Análisis Jerárquico integra aspectos cualitativos y cuantitativos en un proceso único de decisión, en el que es posible incorporar simultáneamente los valores personales y el pensamiento lógico-matemático en una estructura única de análisis facilitando y promoviendo la toma de decisiones bajo escenarios que comprenden múltiples criterios

3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE FLUJOS REGIONALES Y SU APORTE A LA RECARGA

En el marco de la necesidad de identificar y delimitar zonas de recarga y flujos regionales para un sistema hidrogeológico, teniendo en cuenta el conjunto de variables que se consideran fundamentales bajo distintos órdenes de importancia y que condicionan el ingreso y movimiento del agua al subsuelo, se propone la aplicación del Análisis Jerárquico Ponderado (AHP) Como herramienta de evaluación de los flujos regionales y su aporte a la recarga. Para su efectiva implementación se seleccionó una muestra representativa conformada por 18 expertos en hidrogeología -de Portugal, Francia, Argentina, México y Colombia- a los cuales se les realizó una encuesta que permitiera jerarquizar en orden de importancia los factores fundamentales para caracterizar la recarga proveniente de flujos regionales. Se consideraron como variables de análisis la presencia de manantiales, la topografía, los patrones estructurales, la textura y la tasa de infiltración. La hidrogeoquímica y la isotopía no entran a hacer parte de la valoración porque ellas constituyen metodologías que se aplican para verificar los flujos hidrogeológicos.

En la tabla 1 se sintetizan los pesos obtenidos. Según estos resultados el factor que tiene mayor

importancia en el momento de definir la recarga proveniente de flujos regionales, son las áreas con topografía adecuada y el de menor importancia es la presencia de manantiales. Cabe señalar que este factor indica que existe flujo a través de las unidades geológicas, pero indican una descarga de agua subterránea.

Para la valoración de cada uno de los factores determinantes en la evaluación de flujos regionales se establecen diferentes calificaciones internas en una escala de 1 a 5, en virtud de que favorezcan o no la recarga, teniendo como elemento espacial de análisis la unidad litológica. A continuación, se describe la forma propuesta de calificación para cada factor:

Tabla 1. Resultados de la metodología de pesos ponderantes para la evaluación de flujos regionales y su aporte a la recarga.

Factor	Peso
Áreas con topografía adecuada (TA)	0,26
Patrones estructurales (E)	0,23
Patrones texturales (PT)	0,21
Condiciones de infiltración (I)	0,19
Presencia de manantiales (M)	0,11

Áreas con topografía adecuada.

Los mapas de pendientes y la evaluación de las variaciones presentadas en estas, permiten la búsqueda de lugares en donde sea posible un almacenamiento temporal de agua que de origen a la infiltración. Estudios realizados por Rahardjo et al. [11], Kim et al. [12] y Ng & Shi, [13], muestran que en laderas con ángulos de hasta 60° puede darse la infiltración del agua. Esto evidencia que tanto las zonas que permiten el almacenamiento del agua, como las zonas cuya pendiente favorece la infiltración, son indicadoras de recarga.

Basándose en esta idea, se asume la calificación más alta, igual a 5, para una pendiente de 0°, y una calificación igual a 1, para una pendiente de 90°. De acuerdo a este planteamiento, se emplea la siguiente función para determinar la calificación de las áreas que presentan una pendiente entre 0 y 90°:

$$TA = 1 + \frac{4 \times (90 - Y)}{90} \quad (1)$$

Dónde:

TA: Topografía Adecuada.

Y: Pendiente en grados.

La calificación asignada a una unidad litológica será el promedio de los valores obtenidos en el área.

Patrones estructurales

Para realizar la calificación correspondiente a los patrones estructurales se evalúa cada unidad litológica basándose en cuatro aspectos fundamentales: actitud de la familia de diaclasas favorable al perfil topográfico; la densidad por metro lineal de las diaclasas; la existencia o no de familias con actitud desfavorable, que junto con la actitud favorable de diaclasamiento, puede generar una condición isotrópica de la infiltración del agua; y el ángulo de buzamiento, que permite determinar si la familia de diaclasas puede cortar el perfil en algún punto de la ladera, o si por el contrario tiende a ser subvertical o completamente vertical, lo que imposibilitaría la recarga al acuífero.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, se propone jerarquizar cada unidad litológica, calificándolo según las valoraciones que se presentan en la tabla 2, la unidad con calificación 1 es la que posee características menos favorables para la recarga, y la unidad con calificación 5 es la que más favorece la recarga proveniente de flujos regionales. Las condiciones de las tipologías que se definen en la tabla 2 se combinan con las características expuestas en la tabla 3.

Tabla 2. Criterio de calificación usado para la tipología estructural

Actitud favorable	Tipo zona recarga	Actitud desfavorable	Buzamiento	Tipo
	≥ 3	NO	< 45°	A
Familias de diaclasas con actitud favorable	x metro lineal	SI	≥ 45°	B
			< 45°	C
	< 3	NO	≥ 45°	D
	diaclasa		< 45°	E
	x metro	SI	≥ 45°	F
	lineal		< 45°	G
			≥ 45°	H
Familias de diaclasas sin actitud favorable				I

Patrones texturales

La textura del suelo hace referencia a las proporciones en que se encuentran distribuidos los

diferentes tamaños de grano en una muestra de suelo y se encuentra directamente relacionada con la porosidad eficaz, la cual no solo depende del tamaño de las partículas sino también del tiempo de drenaje para los materiales más fino-granulares.

Tabla 3. Calificación asignada para cada tipo de afloramiento

Tipo	Ejemplo descripción	Valor
A	Roca con familias de diaclasas con actitud favorable (dupla rumbo/buzamiento a favor del perfil topográfico), con densidad > 3 diaclasa * m, 0 familias de diaclasas con actitud no favorable y un buzamiento ≤ a 45°.	5,0
B	Diaclasas con actitud favorable, densidad > 3 diac * m, , con densidad > 3 diaclasa * m, y un buzamiento > 45°.	4,5
C	Diaclasas con actitud favorable, densidad ≥ 3 diac * m, con familias de diaclasas con actitud no favorable, y buzamiento ≤ 45°.	4,0
D	Diaclasas con actitud favorable, densidad ≥ 3 diac * m, con diaclasas con actitud no favorable y buzamiento > 45°.	3,5
E	Diaclasas actitud favorable, densidad < 3 diac * m, sin familias desfavorable y buzamiento < 45.	3,0
F	Diaclasas actitud favorable, densidad < 3 diac*m, sin familias desfavorables y buzamiento > 45°.	2,5
G	Diaclasas actitud favorable, densidad < 3 y buzamiento ≤ a 45°.	2,0
H	Diaclasas con actitud favorable, densidad < 3 diac * m, con familias de diaclasas con actitud no favorable y un buzamiento > 45°.	1,5
I	Roca sin familias de diaclasas con actitud favorable	1,0

La permeabilidad de un terreno también está relacionada con su textura, aunque puede tener variaciones por la orientación de las partículas, el grado de compactación y la presencia de arcillas [14]. Existen varias tablas que califican parámetros del suelo como la velocidad de infiltración [15], la porosidad eficaz [16], la permeabilidad [14] y la porosidad [14] [17] [18] con la textura que éste posee. Partiendo de las diferentes tablas mencionadas, las cuales se encuentran en

Custodio & Llamas [14], se estableció una categorización de las características texturales de un suelo a partir de su comportamiento ante la recarga de una unidad hidrogeológica; en la tabla 4 se presenta dicha categorización, tomando el 1 como el valor menos favorable y el 5 como el más favorable a la recarga.

Dado que en el desarrollo de un perfil de meteorización, la presencia de altos porcentajes de grava es poco probable, se le asigna a las texturas que reportan arenas finas y arenas limosas, la mayor calificación; en el caso de las texturas que presentan una mezcla de arenas con partículas fino granulares, se asignará el valor de 3; el valor de 1 se asigna a texturas arcillosas que limitan la infiltración.

Tabla 4. Categorización de las características texturales de un suelo

FACTOR	PESO
Grava	5
Arena, Grava-arenosa	5
Arena fina, Arena-limosa	5
Limo, limo-arenoso, arcillo-arenoso	3
Arcilla	1

Condiciones de infiltración

Para la calificación del parámetro de infiltración se tomó como base la tabla de la guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo [19], en ésta se establece una calificación cualitativa para cada valor de velocidad de infiltración según los intervalos que se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Velocidades y clases de infiltración [19].

velocidad de infiltración (cm/hora)	Clases de Infiltración
>50,80	Muy rápido
15,24-50,80	Rápido
5,08-15,24	Moderadamente rápido
1,52-5,08	Moderado
0,51-1,52	Moderadamente lento
0,15-0,51	Lento
0,004-0,15	Muy lento
<0,004	Impermeable

A partir de las 8 calificaciones se realiza una agrupación para establecer la calificación de cada unidad de acuerdo a las condiciones observadas en las diferentes pruebas.

Dado que la velocidad de infiltración está directamente relacionada con los patrones texturales que presenta el suelo, se asigna una calificación análoga a la establecida en el ítem anterior. Se califica con 5 a aquellas unidades que presenten una velocidad de infiltración superior a 1,52 cm/h, con 3 a las unidades que tengan una velocidad entre 1,52 y 0,004 cm/h y con 1 a aquellas que sean inferiores a 0,004 cm/h. La agrupación en categorías se muestra en la tabla 7.

Tabla 6. Calificación otorgada según las condiciones de infiltración

Velocidad Infiltración (cm/h)	Cualidad del Suelo	Calificación
0-0,004	Impermeable	1
0,004 a 1,52	Lento	3
1,52 a 5,08	Moderado	5
5,08 a 50,8	Rápido	5
>50,8	Muy rápido	5

La asignación de ésta calificación se basa en los resultados de las pruebas de infiltración realizadas en las diferentes unidades litológicas, a partir de las cuales se establecen la calificaciones para cada unidad de acuerdo al resultado de infiltración predominante y, además, se busca una relación con las características texturales de los perfiles de meteorización de la formación, ya que al momento de realizar la prueba, las condiciones del terreno pueden no corresponder a las condiciones naturales y por lo tanto obtener un resultado alejado de la realidad. Para asignar la calificación para la infiltración a una unidad en la que no se realice una prueba de este tipo, se consideran las características de los perfiles de meteorización que se asocian a las condiciones de porosidad del terreno.

Presencia de manantiales

Los manantiales son puntos de agua que indican la descarga del flujo de agua subterráneo por las unidades litológicas, esto evidencia que las zonas donde afloran no representan zonas de recarga, sin embargo, son indicadores de la existencia de un flujo subterráneo, por lo cual fueron considerados dentro de la metodología de evaluación con el factor de peso más bajo de la misma. Este parámetro fue calificado teniendo en cuenta la existencia de manantiales en cada unidad litológica, asignando la mayor calificación (5) a las unidades

que no presentan manantiales, y la menor calificación (1) a las unidades litológicas que los poseen. Cuando no se cuenta con un inventario de manantiales, se le asigna una calificación de 3 a todas las unidades litológicas, con el propósito de no afectar la aplicación del método.

Categorización de flujos regionales y zonas de recarga directa

Para la categorización de los flujos regionales y su aporte a la recarga considerando los factores de peso de cada variable, se aplica por unidad geológica la siguiente función:

$$IFR=0,26(T)+0,23(E)+0,21(PT)+0,19(I)+0,11(M) \quad (2)$$

Dónde:

IFR: Índice de flujos regionales

T: Topografía

E: Estructuras

PT: Patrones texturales

I: Infiltración

M: Manantiales

Esta función consiste en multiplicar cada factor determinante, para la identificación de flujos regionales, por el peso ponderante hallado mediante la metodología AHP.

En la tabla 7 se presenta la categorización obtenida después de aplicar la función anterior, y se establecen los rangos para la agrupación en 4 clases (calificación entre 1 y 4), de las zonas identificadas con flujos regionales. Según los valores de IFR obtenidos, se tendrán entonces categorías de recarga por aportes regionales con diferente importancia: i) Alta -4 a 5-, ii) Media -3 a 4-, iii) Baja -2 a 4- y iv) Muy baja -1 a 2-. Dentro de esta metodología las zonas de recarga directa, serán consideradas las de mayor importancia (calificación 5), porque a través de ellas el flujo desde la superficie hacia el acuífero está condicionada por la textura y la infiltración, haciendo que el tiempo transcurrido entre el evento de precipitación y el aporte al acuífero sea reducido. En Kumar & Ramanathan [20] y en Zaidy et al. [21] se han encontrado referentes similares en términos metodológicos para la delimitación de zonas de recarga.

4. CASO DE ESTUDIO

El Valle de Aburrá, cuenca natural del río Aburrá-Medellín, es una subregión ubicada en el centro del departamento Antioquia (Colombia).

Tabla 7. Categorización de las zonas de recarga en el norte del Valle de Aburrá.

CAL	TIPO DE ZONA	CRITERIOS
5	Zona de recarga directa	*Recarga más importante en términos de magnitud. El flujo desde la superficie hacia el acuífero esta mediado solo por la infiltración y el tiempo de rezago en relación con la precipitación es mínimo.
4	Zona de recarga indirecta de importancia alta	*Áreas geomorfológicamente adecuadas para el almacenamiento temporal en superficie / Perfiles de meteorización con permeabilidad alta, que tengan manantiales asociados. / Patrones estructurales dominantes favorecen el flujo subterráneo en dirección a unidades acuíferas.
3	Zona de recarga indirecta de importancia media	*Áreas geomorfológicamente adecuadas para almacenamiento temporal en superficie / Perfiles de meteorización con permeabilidad media / Patrones estructurales con algún componente favorable al flujo en dirección a unidades acuíferas vecinas.
2	Zona de recarga indirecta de importancia baja	*Áreas geomorfológicamente adecuadas para el almacenamiento temporal en superficie. / Perfiles de meteorización con permeabilidad baja / Patrones estructurales con algún componente favorable al flujo en dirección a unidades acuíferas vecinas de poca extensión.
1	Zona de recarga indirecta de importancia muy baja	*Áreas geomorfológicamente adecuadas para el almacenamiento temporal en superficie / Meteorización con una permeabilidad muy limitada / Escasos patrones estructurales favorables al flujo dirigido al acuífero

En este territorio afloran rocas de edades Paleozoico a Cuaternario, afectadas estructuralmente por complejos sistemas de fallas.

De acuerdo con los estudios hidrogeológicos realizados en el territorio, se han identificado tres unidades hidrogeológicas de carácter acuífero: (figura 3) i) El Acuífero libre de Valle de Aburrá: Conformado por los depósitos aluviales del río Medellín y sus afluentes, y los depósitos de vertiente categorizados como flujos de lodo y escombros con edades Neógeno o Cuaternario; ii) El Acuífero semiconfinado del Centro y Sur del Valle: Conformado por depósitos de origen aluvial, separados del acuífero libre por una capa sellante de carácter arcilloso, cuyo espesor varía entre 0 y 57 m con una media de 12,8 m; y iii) Acuífero de la Dunita de Medellín: El grado de fracturamiento de esta unidad de roca, sumado a la aparente condición de pseudokarst que se registra en algunos sectores [22], y algunos datos de caudal reportados en afloramientos y obras de control geotécnico, indican que en la Dunita de Medellín se podría estar almacenando un importante volumen de agua subterránea que podría llegar a ser utilizable con fines de abastecimiento en algunos sectores del área urbana o rural de los municipios de Bello, Medellín o Envigado.

Para la determinación de las potenciales zonas de recarga en el centro y sur del Valle de Aburrá se tiene como hipótesis la existencia de tres posibles fuentes de recarga: i) en principio se tiene una recarga distribuida en las superficies libres donde afloran las unidades acuíferas, ii) una segunda fuente de recarga que se daría a partir de la interacción hidráulica que existe entre los principales cuerpos de agua superficial, como lo son el río Aburrá-Medellín y sus principales afluentes, y iii) por último una recarga proveniente de los aportes de flujos regionales, a partir de las rocas encajantes, ígneas y metamórficas, que presentan permeabilidad secundaria.

Para la determinación y delimitación de zonas de recarga el sistema hidrogeológico del Valle de Aburrá, se realizó el levantamiento de información que permitió contar con los siguientes insumos: i) modelo hidrogeológico conceptual [23], ii) mapa geológico escala 1:10.000 [24], iii) modelo digital de terreno modelado a partir de cartografía básica a escala 1:10.000, iv) propiedades texturales de los suelos según mapa de suelos de Antioquia y 30 análisis granulométricos aplicados sobre muestras de suelo asociadas a diferentes unidades geológicas, v) tasas de infiltración para 20 puntos, obtenidas mediante análisis de infiltración con anillos concéntricos, vi) inventario de manantiales,

vii) análisis estructural a partir del informe de microzonificación sísmica del Valle de Aburrá [22] y control en campo.

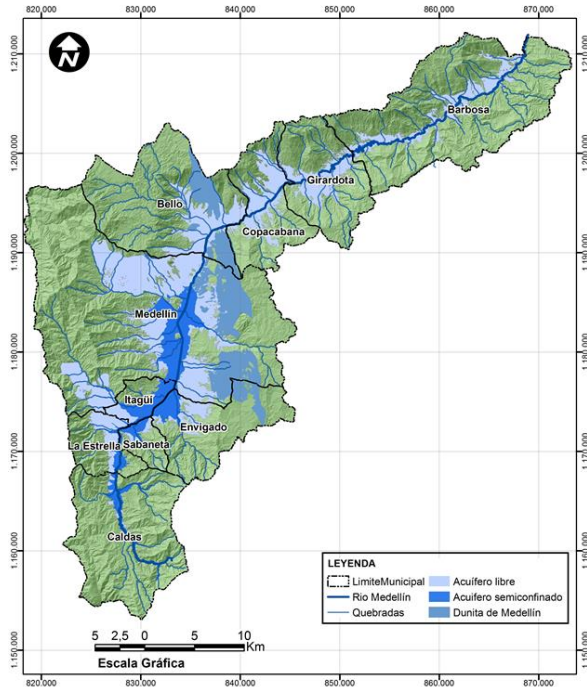


Fig. 3. Unidades hidrogeológicas en el Valle de Aburrá [22].

Son zonas de recarga directa al acuífero libre del Valle de Aburrá y al acuífero de la Dunita de Medellín, todas aquellas áreas en las que afloran los depósitos y la roca en la superficie y donde no se ha presentado impermeabilización del suelo por efectos del desarrollo urbano.

Al acoplar para todo el Valle de Aburrá, cada uno de los parámetros involucrados en la metodología expuesta en el numeral 2, se obtuvo que la mayor parte del valle corresponde a la categoría de zona de recarga de importancia media; la siguiente categoría con mayor área corresponde a la zona de recarga directa, la cual está limitada al acuífero libre; la zona de recarga de importancia alta, sólo se presenta con áreas mayores a 2 km² en el extremo suroccidental del valle y al noroccidente del municipio de Bello, en el resto del valle el área que cubre esta categoría es menor; la importancia baja se encuentra en pequeñas áreas de los municipios de Caldas, Itagüí, Envigado, Medellín, Bello y Copacabana. En la tabla 8 se muestran las unidades geológicas agrupadas de acuerdo a la

zona de recarga a la cual pertenecen. Esta información se sintetiza en el mapa de la figura 4.

Tabla 8. Categorización de zonas de recarga por unidad litológica

ZONA DE RECARGA	UNIDAD LITOLÓGICA
Directa	Depósitos Aluviales (Qal) Depósitos Aluviotorrenciales (Qat) Depósitos de Flujos de Escombros (QFIII, QFIV, NQFII, NFI)
Importancia Alta	Dunita de Medellín (JKuM) Llenos Antrópicos (QII) Depósitos Aluviales (Qal) Depósitos Aluviotorrenciales (Qat) Depósitos de Flujos de Escombros (QFIII, QFIV, NQFII, NFI)
Importancia Media	Stock de Amagá (TRgA) Miembro volcánico (KvQG) Miembro Volcanosedimentario (KvsQG) Batolito Antioqueño (KcdA) Stock de Las Estancias (KcdE) Tonalita de Ovejas (KtO) Stock de Altavista (KdA) Metabasitas del Picacho (JKmbP) Milonita de La Iguaná (Jml) Peridotita de Romeral (JuR) Gabros de Romeral (JgR) Esquistos de Cajamarca (TReC) Anfibolitas de Medellín (TRaM) Esquistos anfibólicos de Baldías (TReaB) Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP) Gneis de La Ceja (TRgLC) Gneis de Palmitas (TRgP) Anfibolitas del Alto de Minas (PZaAM) Esquistos de Caldas (PZeC) Anfibolita granatífera de Caldas (PZagC) Miembro volcánico (KvQG) Stock de Media Luna (KcdML)
Importancia Baja	Gabro de San Diego (KgSD) Gabros de Copacabana (KgC) Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS) Anfibolitas de Medellín (TRaM)

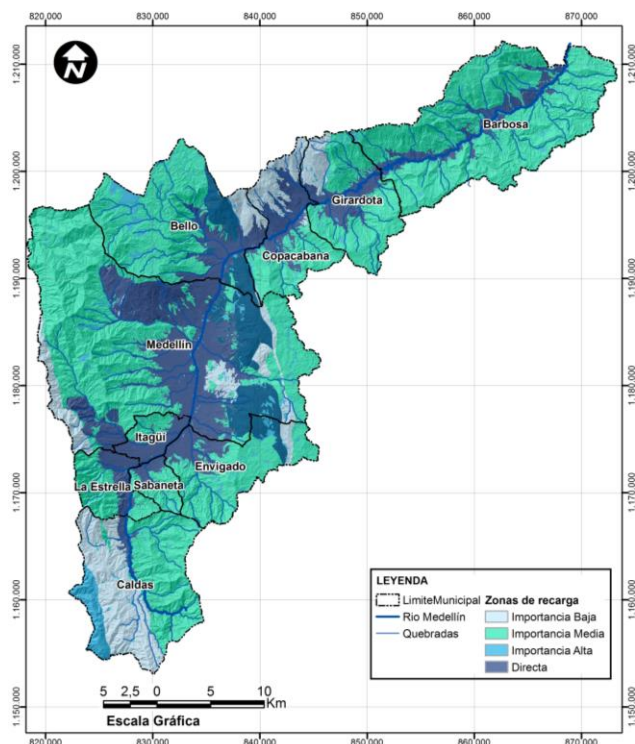


Fig. 9. Zonas de recarga del Valle de Aburrá [21]

3. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una propuesta metodología basada en técnicas de decisión multicriterio, con el propósito de determinar zonas de recarga para un acuífero. La aproximación utilizada corresponde al proceso de análisis jerárquico [8]. Esta metodología pudo aplicarse satisfactoriamente para la identificación de las zonas de recarga de un acuífero localizado en el Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia).

En el análisis realizado para el estudio de la dinámica de flujo que determina la recarga del acuífero debido a los flujos regionales, se consideraron y valoraron las siguientes variables determinantes: localización de manantiales (11%), identificación de áreas con topografía adecuada (26%), determinación de patrones estructurales (23%), determinación de las condiciones de infiltración (19%) y la evaluación de patrones texturales (21%). Igualmente, La hidrogeoquímica y la isotopía fueron utilizadas para verificar los flujos hidrogeológicos.

Para la valoración de las variables consideradas como determinantes en los flujos regionales y su

aporte a la recarga, se consultaron 18 expertos en hidrogeología, los cuales respondieron a una encuesta que permitió jerarquizar en orden de importancia estas variables. Los resultados de las encuestas mostraron que la variable que tiene mayor importancia en el momento de definir la recarga proveniente de flujos regionales, son las áreas con topografía adecuada y la de menor importancia es la presencia de manantiales.

Finalmente, la metodología propuesta fue aplicada en el sistema hidrogeológico del Valle de Aburrá. Del análisis se obtuvo que la mayor parte del valle corresponde a la categoría de zona de recarga de importancia media; la siguiente categoría con mayor área correspondió a la zona de recarga directa, la cual está limitada al acuífero libre y a la Dunita de Medellín; la zona de recarga de importancia alta, sólo se presentó con áreas mayores a 2 km² en el extremo suroccidental del valle y al noroccidente del municipio de Bello, en el resto del valle el área que cubre esta categoría es menor; la importancia baja se encontró en pequeñas áreas de los municipios de Caldas, Itagüí, Envigado, Medellín, Bello y Copacabana.

4. AGRADECIMIENTOS

A la subdirección de Planeación Integral del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y al equipo de profesionales y estudiantes de la Universidad de Antioquia que realizaron el trabajo de campo para el levantamiento de la información.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Panwar, S., & Chakrapani, G. Climate Change and Its Impact on Groundwater Resources. *Current Science*, 105(1), 37–46, 2013.
- [2] Lobo Ferreira, J.P., & Leitão, T.E. Demonstrating managed aquifer recharge as a solution for climate change adaptation: results from Gabardine project and asemwaterNet coordination action in the Algarve region (Portugal). *Acque Sotteranee, Italian Journal of Groundwater*, 3/137: 15-22, 2014.
- [3] Universidad de Antioquia & Área Metropolitana del Valle de Aburrá. determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el norte del valle de Aburrá. Informe final Contrato 405 de 2011. 269 p, 2011.

- [4] Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Consorcio Microzonificación Solingral S.A., Integral S.A., Inteinsa, Universidad EAFIT, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Informe Final para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 745 p, 2007.
- [5] Escobar, J., Betancur, T., Martínez, C., & Palacio, P. Metodología Geoespacial para la evaluación de zonas de recarga usando el proceso de análisis jerárquico ponderado. V Congreso Colombiano de Hidrogeología, Medellín, 2014.
- [6] Universidad de Antioquia & Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad de Antioquia. Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el norte del Valle de Aburrá (DPPZRNV). Medellín. Informe Final. Contrato 405 de 2011. 269 p. Disponible en http://www.metropol.gov.co/recursos_hidrico/Publicaciones/Determinacion_y_proteccion.pdf, 2012.
- [7] Keeney, R. L., & Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs, Wiley and Sons, New York. 569 p, 1976.
- [8] Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences. V-2, 83-98, 2000.
- [9] Roy, B. Algèbre Moderne et Théorie des Graphes Orientées Vers les Sciences Economiques et Sociales: Volume 1: Notions et Résultats Fondamentaux. Dunond: Paris. 518 p, 1969.
- [10] Roy, B. Méthodologie multicritère d'aide à la décision, Paris, Économica. 423 p, 1985.
- [11] Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B., & Leong, E. C. Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slopes under Rainfall. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007.
- [12] Kim, J., Jeong, S., Park, S., & Sharma, J. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. Eng. Geology, 75(3-4). 251-262 p. 2004.
- [13] Ng, C. W., & Shi, Q. A Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage. Computers and Geotechnics, 22(1), 1-28, 1998.
- [14] Custodio, E., & Llamas, M. R. Hidrología subterránea. Barcelona: Ediciones Omega S.A, 1064-1077, 1996.
- [15] Hillel, D. J. Introduction to Soil Physics. Elsevier Science. 392 p, 1982.
- [16] Johnson, A. I. Specific yield. Compilation of specific yields for various materials. U.S. Geological Survey Water Supply Papers. 1662-D, 1967.
- [17] Schoeller, H. (1965). Hydrodynamique dans le Karts, Hydrologie des Roches Fissurées, Colloque du Dubronik. Hydrol. Scien, 1, 3-20.
- [18] Morris, D. A., & Johnson, A. I. (1967). Summary of hydrological and physical properties of rock and soil materials as analyzed by the hydrological laboratory of the US Geological Survey 1948-1960, U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap., 1839-D, 39.
- [19] USDA. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Trad A. Lutens; J. C. Salazar Lea P. Buenos Aires: CRN-CNIA-INTA. 82 p, 1999.
- [20] Kumar, M., & Ramanathan, A. Identification of aquifer-recharge zones and sources in an urban development area (Delhi, India), by correlating isotopic tracers with hydrological features. Hydrogeology Journal, 19: 463-474, 2011.
- [21] Zaidi, F., Nazzal, Y., Ahmed, I., Naeem, M., & Kamar, M. Identification of potential artificial groundwater recharge zones in Northwestern Saudi Arabia usin GIS and Boolean logic. Journal of African Earth Sciences 111. 156-160 p, 2015.
- [22] Universidad de Antioquia & Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Determinación y Protección de las Potenciales Zonas de Recarga en el Centro y Sur del Valle de Aburrá. Medellín. Informe final Contrato 254 de 2013. 343 p, 2014.
- [23] Betancur T, Campillo A.K, Taupin J.D & Patris N. "Uso de la geoquímica y de los isótopos estables del agua en el estudio de un sistema acuífero superficial en el complejo urbanizado andino (Valle de Aburrá, Colombia)" En: Perú. Revista Peruana Geoatmosférica RPGA. ISSN: 2078-1199 p.62 - 79 v.4, 2015.

[24] Consorcio Microzonificación. Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Informe Final para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 745 P, 2006.