

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR ZONAS DE RECARGA
HÍDRICA EN MUNICIPIOS O COMUNIDADES CON
RECURSOS FINANCIEROS LIMITADOS**

**METHODOLOGY TO DETERMINE WATER RECHARGE AREAS IN
MUNICIPALITIES OR COMMUNITIES WITH LIMITED FINANCIAL
RESOURCES**

Jorge Luis Figueredo Pan
Ingeniero Ambiental, Ingeniero ambiental en el área de hidrocarburos
Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia
Bogotá, Colombia.
u2700955@unimilitar.edu.co

Artículo de revisión bibliográfica

DIRECTOR

Ph.D. Ximena Lucía Pedraza Nájjar

Doctora en Administración – Universidad de Celaya (México)
Magíster en Calidad y Gestión Integral – Universidad Santo Tomás e Icontec
Especialista en gestión de la producción, la calidad y la tecnología - Universidad Politécnica
de Madrid (España)
Especialista en gerencia de procesos, calidad e innovación – Universidad EAN (Bogotá D.C.)
Microbióloga Industrial – Pontificia Universidad Javeriana
Auditor de certificación: sistemas de gestión y de producto

Gestora Especialización en Gerencia de la Calidad - Universidad Militar Nueva Granada
ximena.pedraza@unimilitar.edu.co; gerencia.calidad@unimilitar.edu.co



La U
acreditada
para todos

**ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO DE RECURSOS
NATURALES
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
NOVIEMBRE DE 2019**

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR ZONAS DE RECARGA HÍDRICA EN MUNICIPIOS O COMUNIDADES CON RECURSOS FINANCIEROS LIMITADOS

METHODOLOGY TO DETERMINE WATER RECHARGE AREAS IN MUNICIPALITIES OR COMMUNITIES WITH LIMITED FINANCIAL RESOURCES

Jorge Luis Figueredo Pan
Ingeniero Ambiental, Ingeniero ambiental en el área de hidrocarburos
Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia
Bogotá, Colombia.
u2700955@unimilitar.edu.co

RESUMEN

La recarga, es el proceso de infiltración del agua hacia un acuífero, y la zona donde se da este proceso se denomina zona de recarga. En gran parte del territorio colombiano, en especial en municipios o comunidades donde su fuente de abastecimiento de agua para usos domésticos y/o agrícolas, son las aguas subterráneas, y en la mayoría no se están implementando estrategias de conservación y protección de las zonas de recarga hídrica de acuíferos, más aún, no se tiene identificado con certeza dichas zonas, esto implica que la gestión de cuenca no está fortalecida. Partiendo de lo mencionado anteriormente, en el presente artículo se pretende identificar las metodologías usadas para la identificación de zonas de recarga hídrica, pero también, que esta metodología permite que un municipio o comunidad con recursos financieros limitados pueda aplicar en su territorio. Se ejecutó una revisión bibliográfica de diferentes metodologías aplicadas y analizadas no solamente en Colombia, también en países de América Latina, entre estos Costa Rica, Cuba, Panamá, Nicaragua, Guatemala y el Salvador; las principales fuentes de consulta se basaron en tesis de maestría, artículos científicos y trabajos de organizaciones de investigación como el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Los resultados de la revisión muestran trabajos importantes en donde aplican metodologías con modelos matemáticos hasta metodologías participativas, así mismo, trabajos investigativos donde se proponen alternativas para la recarga artificial de acuíferos.

Palabras clave: Abastecimiento, agua subterránea, conservación, gestión de cuenca, metodología, protección, recarga y zona de recarga.

ABSTRACT

Recharging is the process of infiltrating water into an aquifer; and the area where this process occurs is called the reload zone. In much of Colombia's territory, especially in municipalities or

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

communities where their source of water for domestic and/or agricultural uses is groundwater, and most are not implementing conservation and protection strategies of the aquifer water recharge zones, but even more so, these areas are not identified with certainty, this implies that the basin management is not strengthened. Based on the above, this article is intended to identify the methodologies used for the identification of water recharge zones, but also, that this methodology allows a municipality or community with financial resources limits may apply in its territory. A bibliography review of different methodologies applied and analyzed was carried out not only in Colombia, but in countries of Latin America, among these Costa Rica, Cuba, Panama, Nicaragua, Guatemala and El Salvador; the main sources of consultation were based on master's thesis, scientific articles and works of research organizations such as the Tropical Agronomic Research and Teaching Center (CATIE). The results of the review show important work in which they apply methodologies with mathematical models to participatory methodologies, as well as research works where alternatives are proposed for the artificial recharge of aquifers.

Keywords: Catering, underground water, conservation, basin management, methodology, protection, recharge and recharge zone.

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico durante muchos años ha sido parte del desarrollo del ser humano, ha jugado un papel importante en las actividades diarias de las personas. Guerrero (2006) argumenta que en gran parte de Colombia el tema de agua subterránea es un recurso ignorado o pobremente conocido, en otras es torpemente manejado, y solamente en algunos lugares del país se utiliza racionalmente. Mas aún, el recurso hídrico subterráneo como parte del ciclo hidrológico suele ser desconocido en la evaluación y gestión del recurso agua, teniendo en cuenta que, en gran parte del territorio nacional, hay municipios donde su fuente de abastecimiento es agua subterránea, por ejemplo, de los cuatros municipios del departamento del Vichada, tres cuentan con acueductos que se abastecen de agua subterránea (Figueredo, 2016); sin mencionar el departamento de la Guajira. En el Estudio Nacional del Agua 2014 se identificaron y delimitaron 62 sistemas acuíferos en Colombia (IDEAM, 2015), por tanto, le da una importancia significativa a la conservación y protección de las zonas de recarga de aguas subterráneas.

El Estudio Nacional del Agua 2018 presenta por primera vez un Mapa Nacional de Zonas Potenciales de Recarga, en donde se identificaron zonas con alta potencialidad de recarga, con

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

moderada potencialidad de recarga, baja potencialidad de recarga y muy baja potencialidad de recarga, entre las más relevantes zonas con alta potencialidad están las provincias hidrogeológicas de los Llanos Orientales, La Guajira, Cesar – Ranchería, Vaupés – Amazona, Cordillera Oriental, entre otras (IDEAM, 2019); dando aún más importancia a la identificación de zonas de recarga de aguas subterráneas.

Partiendo de lo dicho anteriormente, según el artículo 14 del decreto 953 de 2013, todas las entidades territoriales deberán tener predios adquiridos en cuanto a áreas de importancia estratégica que surtan los acueductos municipales, distritales y regionales. Siendo así, muchos municipios o comunidades no cuentan con suficiente presupuesto para realizar estudios que permitan identificar zonas de recarga de aguas subterráneas, en vista de que, muchas metodologías para determinar estas zonas, son de elevados costos. Es así como el presente artículo de revisión bibliográfica pretende buscar la metodología más adecuada para el logro de la identificación de zonas de recarga hídrica en aquellos municipios o comunidades que cuentan con un recurso financiero limitado frente a la gestión de sus cuencas hidrográficas.

El país pionero en el recurso hídrico subterráneo es Costa Rica, dado que, ha realizado muchos estudios sobre la identificación de las zonas de recarga de aguas subterránea, de igual manera, hay estudios en Panamá, Cuba, Nicaragua, Guatemala, El Salvador y Colombia. Mora y Ruiz (2018) al momento de determinar las áreas de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Frijoles y Guacalito, Upala, Costa Rica, plantean el análisis de las variables biofísicas, es decir, un balance hídrico de suelos donde determinan la precipitación y evapotranspiración potencial (ETP), suelo, uso actual de la tierra, pendientes, infiltración básica, profundidad de las raíces, la interpretación de la lluvia en el follaje y humedad inicial en el suelo; y finalmente determinar y

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

clasificar las zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas mediante la ecuación de Schosinsky Nevermann.

Rodríguez y Pérez (2014) para determinar la recarga hídrica potencial de la zona hidrográfica Guara, Cuba, reafirma la ecuación de Schosinsky Nervermann, es decir, el método de balance hídrico de suelos, pero menciona otros tipos de metodologías como lo son: Método del balance de agua, método hidroquímico, método participativo y métodos de grafico de balance de las aguas subterráneas. Noriega (2005) también plantea la determinación de las zonas de recarga hídrica mediante el método de balance hídrico de suelos.

Vélez y Rhenals (2008) identificaron las zonas de recargas de aguas subterráneas en los acuíferos de Santa Fe de Antioquia, Colombia, mediante el método de isótopos. De igual forma, Vélez y Vásquez (2004) describen los diferentes métodos para determinar la recarga de acuíferos, los cuales son, balance de agua (balance de humedad del suelo, balance en ríos y canales de agua, aumento del nivel freático), medidas directas, método de trazadores (Isótopos de Hidrogeno, Isótopos de Oxigeno e Isótopos de Carbono), aproximación de Darcy y métodos empíricos.

Matus (2007) propone para la identificación de las zonas de recarga de aguas subterráneas, evaluar los siguientes elementos biofísicos: Pendiente y microrelieve, tipo del suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo. Dicha metodología tiene algo diferente que las demás, esta se planteó para ser una metodología de bajo costo y de aplicación simple, que permita de alguna u otra manera a los actores locales ser parte de ella. Matus buscaba integrar el conocimiento técnico y científico con el conocimiento local de las comunidades.

Gómez (2015) mediante los jardines de lluvias implementados en el Eje Cafetero colombiano, plantea como una estrategia de recarga artificial de acuíferos teniendo en cuenta a la problemática de expansión urbano y de poca área de infiltración.

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

El presente artículo bibliográfico no solo permitirá determinar cuál es la metodología de bajo costo para identificar las zonas ya mencionadas, sino también, plantear una estrategia para garantizar la recarga de los acuíferos de una manera artificial. Siendo así, se sugiere que la metodología de bajo costo y la más adecuada para aquellos municipios o comunidades de recursos financieros limitados es la planteada por Matus, además de que incluye el conocimiento de los actores locales. Por otra parte, la estrategia que se propone para la recarga artificial de acuíferos es mediante jardines de lluvia.

Los jardines de lluvia no solo se sugiere ser una estrategia rural para aquellas zonas de recarga de agua subterránea, sino también, una estrategia de gestión de ambiental y de ordenamiento territorial. Es importante mencionar que estas zonas de recarga hídrica son áreas de importancia ambiental, por tal motivo, la compra de predios para la protección de estas mismas, hace parte de las estrategias que cada municipio en donde su fuente de abastecimiento son aguas subterráneas, deben implementar de una manera rigurosa. Todo lo dicho anteriormente, hace parte de una planificación ambiental por parte del municipio.

En este artículo bibliográfico, se tocarán conceptos como recarga, la cual, se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza hacer parte de las reservas subterráneas. De igual forma, las zonas de recarga de hídrica subterránea, son zonas de la cuenca donde el flujo vertical de la infiltración es importante teniendo en cuenta los diferentes parámetros biofísicos como pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, entre otras; es de esta manera como los acuíferos son recargados. El presente artículo tendrá una estructura donde se especificará los materiales y métodos utilizados, como también, los resultados, discusiones y conclusiones generadas después de una revisión bibliográfica acerca de las diferentes metodologías para

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

identificar las zonas de recarga hídrica de aguas subterráneas, de igual manera, las alternativas para conservar y proteger estas zonas o los acuíferos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente revisión bibliográfica se realizó sobre 32 artículos y trabajos de grado de tesis de magister, publicados entre 2000 y 2019, esto permitió identificar 24 de estos que aportan de una manera significativa en el desarrollo del artículo con enfoque bibliográfico. El proceso de búsqueda se efectuó en Scielo, revista de investigación Agraria y Ambiental, revista Repositorio Científico, repositorio del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), centro de documentos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Google académico, repositorios de universidades como Nacional de Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Universidad de Costa Rica, Universidad de la Salle, Universidad de San Carlos de Guatemala, Universidad Nacional del Altiplano, entre otras. Los términos claves para la búsqueda, se destacan: *recarga*, *zonas de recarga hídrica*, *metodología*, *agua subterránea*. El material bibliográfico no solo consta de conocimiento nacional, también de vivencias y trabajos realizados a nivel internacional, más en países de América Latina.

Es importante para el presente artículo bibliográfico recordar conceptos importantes que tiene una relación directa o indirecta con el tema de zonas de recarga hídrica de aguas subterráneas. Para Gonzáles (2011) una **cuenca hidrográfica** representa un área natural en donde se capta y se concentra aguas superficiales y subterráneas, y que por lo tanto presenta un vínculo esencialmente volumétrica e hidrológica. En el contexto de recarga hídrica, se debe mencionar la **precipitación efectiva**, el cual, según Linsley (1998) citado por Matus (2011) es el volumen de agua precipitada que se infiltra en el perfil de suelo y esta de forma disponible; y se aprovechada por las raíces de los árboles o en su defecto, alcanza estratos profundos como los

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

acuíferos. Núñez (2011) citado por Matus (2011) la **escorrentía** es la cantidad de lluvia que excede la capacidad de infiltración del suelo; cuando el exceso de lluvia supera la capacidad de almacenamiento del suelo, el agua fluye en sentido longitudinal de la pendiente, el exceso de agua escurre hacia los arroyos, ríos, quebradas, lagos y océanos, de igual forma, Matus enfatiza que una vez el volumen de precipitación cubra toda la demanda que haya en el área, ocurre la escorrentía superficial. Según Vélez y Vásquez (2004) la **recarga** se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza hacer parte de las reservas subterráneas (ver imagen N° 1).

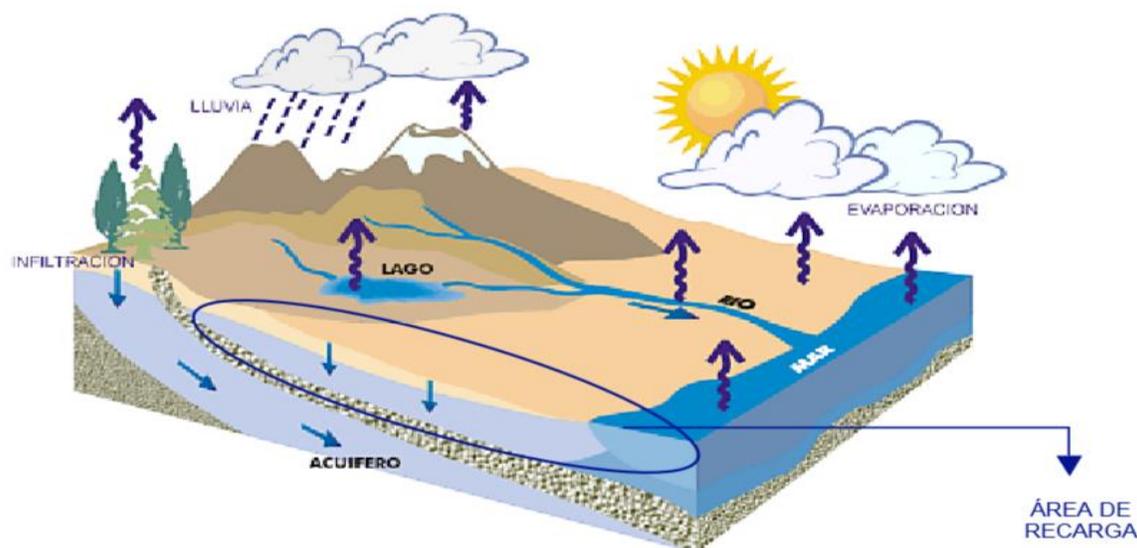


Imagen 1. Área de recarga hídrica de aguas subterráneas. Guzmán, Ana, Hernández, Arnulfo, (2007).

La zona de recarga hídrica es aquella área en donde se da el proceso de infiltración de agua hacia los estratos más profundos, acuíferos. Esta recarga depende de muchos factores, como es el tipo de roca, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente y el uso de suelo de la zona. Según Faustino (2006) citado por Figueredo (2016), enfatiza que, de acuerdo con el movimiento del agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso, la zona de recarga hídrica se puede clasificar en:

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

- Zonas de recarga hídrica superficiales: prácticamente es toda la cuenca hidrográfica, exceptuando las zonas totalmente impermeables, esta es la que se humedece después de cada lluvia, originando escorrentía superficial, según las condiciones de drenaje (relieve del suelo y su saturación). La medición de este caudal se realiza en el cauce principal del río y se conoce como descarga superficial o caudal de escorrentía superficial.
- Zonas de recarga hídrica subsuperficial: es la que corresponde a las zonas de la cuenca con suelos con capacidad de retención de agua o almacenamiento superficial sobre una capa impermeable, que permite que el flujo horizontal en el subsuelo se concentre aguas abajo en el sistema de drenaje. Es la ocurrencia de caudales en la red hídrica, aun cuando las lluvias hayan finalizado, también dependen de la cantidad de precipitación y el efecto “esponja” del suelo.
- Zonas de recarga hídrica subterránea: es la que corresponde a las zonas de la cuenca (sitios planos o cóncavos, y rocas permeables) en el cual el flujo vertical de la infiltración es significativo; esta es la que forma o alimenta los acuíferos. Un aspecto importante en esta zonificación es la conexión entre acuíferos y la recarga externa (que viene de otra cuenca).
- Zonas de recarga hídrica sobterránea: es la que corresponde a zonas de la cuenca que presenta fallas geológicas profundas o cuando en el balance hidrogeológico se identifica una pérdida de percolación profunda. Generalmente coincide con las zonas de recarga subterránea.

Dourojeanni (1994) citado por Gonzáles (2011) la **gestión de cuencas** es un proceso donde el ser humano realiza un conjunto de acciones planificadas, coordinadas, organizadas,

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

para manejar, proteger, conservar y administrar adecuadamente la unidad hidrográfica, considerando su efecto y que la dinámica de dicho sistema, tienen diferentes connotaciones.

A continuación, se mencionará las diferentes metodologías para identificar las zonas de recarga hídrica de aguas subterráneas:

Metodologías para identificar las zonas de recarga hídrica.

Método RAS.

González (2011) hace referencia del modelo RAS para identificar las zonas de recarga de aguas subterránea. Dicho método es un proceso científico, teórico para elaborar el mapa de la recarga hídrica, elaborado por Forges (2005); este se basa en calcular el agua que se infiltra en el subsuelo, basado en los principios de Schosinsky y Losilla (2000). Gonzalez en su estudio para el manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá, utilizo el método RAS para aproximar a la realidad sobre el potencial de recarga hídrica en dicha subcuenca. Para realizar el mapeo, tuvo en cuenta características o factores importantes que inciden en la recarga como tal, estos son:

- El clima
- La geología en conjuntos con la vegetación
- La topografía y el uso de suelos.

Como se dijo anteriormente, este método es científico y teórico, por tal motivo, para la identificación del potencial de recarga hídrica en una zona determinada, se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$R=BC * C$$

R: Recarga de acuífero

BC: Balance Climático

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

C: Coeficiente de infiltración

C: $k_{fc} + k_p + k_v$

K_{fc} : Coeficiente del tipo de suelo

K_p : Coeficiente de pendiente

K_v : Coeficiente del uso del suelo

El Balance Climático permite obtener información de la cantidad de agua que está disponible en el área de estudio, para llegar a esa precisión, se necesita hallar dos factores: Precipitación y evapotranspiración real. El coeficiente del tipo de suelo se relaciona con la permeabilidad como tal del suelo (rocas impermeables o suelos arcillosos, las gravas y fallas que facilitan la recarga); es de resaltar las fallas tectónicas que permite la infiltración del agua. El coeficiente de pendiente es un factor de vital importancia, dado que, va relacionado con la escorrentía superficial, por tanto, el mapa topográfico es importante al hallar este coeficiente. El coeficiente del uso del suelo es un factor importante y cambiante en el momento de calcular la recarga; este va relacionado con la evapotranspiración sobre los suelos con diferentes usos del suelo.

Método del Balance de Agua.

El método de balance de agua, se concentra en aplicar el principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido, definidas por unas condiciones de frontera, durante un periodo de tiempo dado (Vélez y Vásquez, 2004), de igual manera, menciona dos tipos de balance: Balance de humedad del suelo y balance en ríos y canales de agua. Los ya citados autores, indican que el otro método de balance de agua es por aumento del nivel freático, este está basado en la premisa de que el aumento de los niveles de agua está relacionado con la recarga que llega al nivel freático. La recarga se calcula utilizando la siguiente expresión:

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

$$R = S\gamma \frac{dh}{dt} = S\gamma \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

$S\gamma = \text{Rendimiento específico}$

$h = \text{Altura del nivel freático}$

$t = \text{Tiempo}$

Método de trazadores

Según Kendall y Caldwell (1998) citado por Vélez y Vásquez (2004) los trazadores son sustancias que estén en el agua, y se pueden identificar visualmente o analíticamente, permiten detectar mecanismos responsables del flujo del agua, fuentes de soluto en el agua y sistemas de contaminación; calcular el ciclo biológico de nutrientes dentro de un ecosistema, determinar fuentes de recarga, etc. El principio general del método de trazadores es el balance de masa:

$$r Tr - P Tp + fd$$

$r = \text{Tasa de recarga promedio}$

$Tr = \text{Concesión promedio de trazador en la recarga}$

$P = \text{precipitación promedio}$

$Tp = \text{Concentración promedio del trazador en la precipitación}$

$fd = \text{Masa del trazador en la zona vadosa}$

Los isotopos más usados en el tema de la hidrología son: Isotopos de Hidrogeno, isotopos del Oxigeno e isotopos del Carbono (Vélez y Vásquez, 2004). De acuerdo con Custodio y Herrera (2000) el ion Cloruro es un clásico trazador hidrogeoquímico en el que se fundamentan múltiples estudios ya que es un componente común en el agua natural y tiene una analítica relativamente sencilla y precisa. Muchos autores enfatizan al momento de describir el método de trazadores o método hidroquímico, el balance del ion Cloruro, dado que es factible por ser un soluto

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

conservativo y que normalmente no es aportando por el terreno; entre sus propiedades están que es muy soluble, no actúa con el medio, es fácil de muestrear (Rodríguez y Pérez, 2014).

Balance hídrico del suelo.

Flores y Ruiz (1998) expresó que el balance hídrico del suelo en cierto modo relaciona la humedad adicionada por medio de la lluvia (P) o Irrigación a las pérdidas por evapotranspiración (ET), escurrimiento (E) y drenaje (D), además de los cambios en el contenido de la humedad aprovechable (CH) en el perfil del suelo. Mora y Ruiz (2018) en su estudio “Determinación de áreas hídrica en las subcuencas de los ríos Frijoles y Guacalito, Upala, Costa Rica” se plantea determinar las áreas potenciales de recarga hídrica a través de la integración de variables biofísicas (precipitación, evapotranspiración potencial, cobertura vegetal, rango de pendiente, velocidad de infiltración, profundidad de las raíces, intercepción de lluvia en el follaje y humedad inicial del suelo). Mora y Ruiz expresan que además de las variables biofísicas, el uso actual de la tierra o suelo hace parte importante para determinar las ya citadas áreas potenciales; además, adhieren a su trabajo de investigación el balance hídrico de suelos.

Los citados autores del trabajo en Costa Rica, argumentan que, de acuerdo a los resultados de las variables biofísicas, fue la base para realizar la ecuación general del balance hídrico del suelo; esta permitió determinar la cantidad potencial de agua infiltrada en los distintos puntos de muestreos, posteriormente determinaron el volumen de recarga acuífera mediante la siguiente ecuación de Schosinsky Nevermann:

$$V = Rp * A$$

V= Volumen de la recarga en año

Rp= Recarga potencial al acuífero en m/año

A= Área donde se genera la recarga potencial en m²

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

Método participativo.

Matus, Faustino y Jiménez (2008) se plantearon realizar una metodología práctica y de aplicación simple por parte de actores locales para identificar las zonas de recarga hídrica; dicha metodología está basada en el conocimiento técnico y científico con el conocimiento y experiencia local de las comunidades de la subcuenca Jucuapa, así mismo, de bajo costo. El método plantea la realización de unos talleres con la comunidad, en donde se usaron herramientas participativas (trabajos grupales, lluvia de ideas, mapeo de recursos naturales y evaluación de los recursos naturales). Según los autores ya mencionados anteriormente, dicha metodología se base en el análisis y evaluación práctica en campo de cinco elementos: pendiente y microrrelieve, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo). Una vez obtenido el resultado de cada uno de los parámetros, se procede a realizar el cálculo de la zona potencial de recarga hídrica mediante la siguiente ecuación del modelo participativo.

$$ZR = [0.27(pend) + 0.23(Ts) + 0.12 (Tr) + 0.25(Cve) + 0.13 (Us)]$$

ZR= Zona de recarga hídrica

Ts= Tipo de suelo

Tr= Tipo de roca

Cve= cobertura vegetal

Us= uso del suelo

Es importante establecer estrategias de conservación en las zonas con potencial de recarga hídrica, es por eso, que autores como por ejemplo Gómez (2015) que propone como una medida de recarga artificial de acuíferos, los jardines de lluvia en el eje cafetero colombiano. El cual consiste en, armar un perfil de suelo con arena y grava y una pequeña capa de humus; a esta le llegara un volumen de agua lluvia, es decir, se aplica el proceso de infiltración.

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

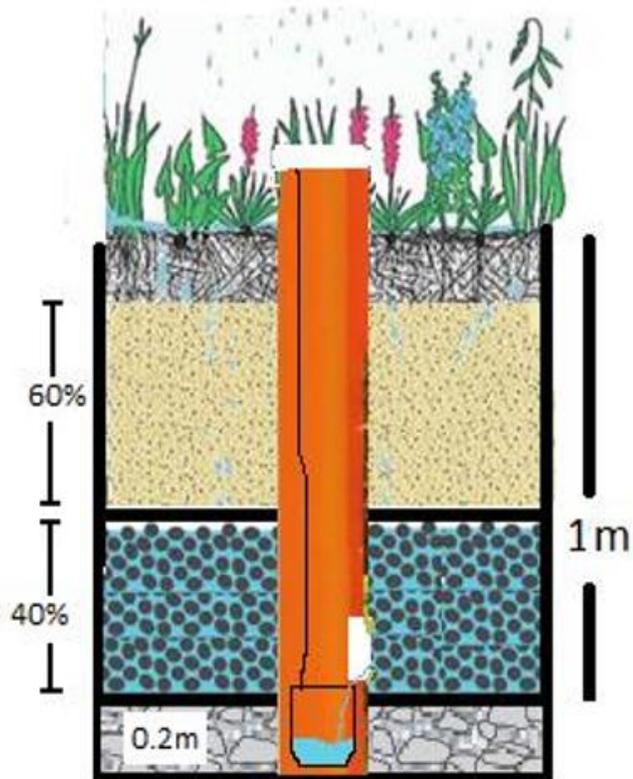


Imagen N° 2. Recarga artificial de acuíferos mediante jardines de lluvia en el eje cafetero colombiano. *Gómez (2015)*.



Imagen 3. Recarga artificial de acuíferos mediante jardines de lluvia en el eje cafetero colombiano. *Gómez (2015)*.

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizado la revisión del contenido de las referencias bibliográficas, se identificaron cinco (5) metodologías mas usadas para la identificación de las zonas de recarga hídrica, las cuales, mediante el siguiente análisis se determinará la metodológica donde se requiere menos costos financieros pero que de alguna u otra manera los resultados sean muy cercanos a las demás metodologías. Mediante el siguiente cuadro se evaluará cada una de las metodologías, identificando sus limitantes u obstáculos, teniendo como referencia el objeto general del presente artículo.

Tabla 1
Metodologías para identificar zonas de recarga hídrica

Metodología	Obstáculos o limitantes	Autores
Método RAS	- Nulo conocimiento local	* Forges (2005)
	- La identificación de cada coeficiente	* Matus (2007)
	- Su costo es considerablemente alto.	* Blanco (2009)
	- Nulo conocimiento local	* González (2011)
	- El canal debe estar fuera de servicio por varios días	* Vélez y Vásquez (2004)
	(Balance en ríos y canales de agua)	* Rodríguez y Pérez (2014)
	- No se puede tener en cuenta en condiciones estables	
Método de balance de agua	(Balance del nivel freático)	

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

	- Su costo es considerablemente alto	
Método de trazadores o isotopos	- Nulo conocimiento local	* Kendall y Caldwell (1998)
	- De muy alto costo	* Custodio y Herrera (2000)
		* Vélez y Vásquez (2004)
		* Vélez y Rhenals (2008)
		* Rodríguez y Pérez (2014)
Método de Balance hídrico del suelo	- Nulo conocimiento local	* Flores y Ruiz (1998)
	- De muy alto costo	* Schosinsky (2006)
	- Difícil comprensión para una comunidad	* Mora y Ruiz (2018)
Método participativo	- Sesgos en la identificación de tipo de suelo	* Matus (2007)
		* Matus, Faustino y Jiménez (2008)
		* Donis (2015)

Tabla 1. Metodologías mas usadas para identificar las zonas de recarga hídrica, con su respectivo limitante u obstáculo, por autoría propia, 2019.

En cierta manera, cada uno de los autores referenciados en el presente artículo, tienen una relación en sus variables para la identificación de zonas con potencial de recarga hídrica, las cuales son: tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente, tipo de roca, uso del suelo, precipitación, profundidad de las raíces, evapotranspiración e infiltración básica, lo cual nos indica, que los resultados para cada metodología no se va a marcar una diferencia prologada en su aplicación en la zona, sin embargo, la diferencia está en como cada autor maneja cada variable de manera cualitativa o cuantitativa. Es importante mencionar que, los primeros conocedores de una zona

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

de estudio es la comunidad, por tanto, el conocimiento local es vital para el éxito de un estudio de investigación o proyecto.

Matus, Faustino y Jiménez (2008) argumentan que, para determinar y delimitar una zona con potencial en recarga hídrica, se requiere de estudios hidrogeológicos especializados, que muchas veces no están dentro de las posibilidades económicas de las comunidades de una microcuenca o subcuenca; por tanto, plantearon una metodología práctica, de bajo costo y aplicación simple por parte de los actores locales para identificar dichas zonas. Como señala Matus, Faustino y Jiménez, muchas veces las comunidades locales no tiene los recursos financieros suficientes para realizar estudios hidrogeológicos especializados, situación que también ocurren con entidades territoriales con limitados recursos financieros, siendo así, una limitante importante para estas entidades en cuanto al cumplimiento del artículo 14 del decreto 953 de 2013, y con respecto a contemplarlas como áreas de interés estratégico para la conservación y proteger un recurso tan vital como el agua.

Partiendo de la información recopilada mediante una revisión bibliográfica y lo enunciado anteriormente, se determina que la metodología participativa de Matus, es la más adecuada para aquellos municipios o comunidades locales con limitados recursos financieros para aportar a una gestión de cuenca.

Así como se mencionó anteriormente, hay muchas limitantes para los entes territoriales o comunidades locales que hacen parte de alguna cuenca o subcuenca, a esto se suma la idea de que, en el momento de conservar y proteger estas zonas no se tiene suficientes estrategias. Es así que, conforme a la revisión literaria se identificó que además de la compra de predios donde se identificaron las zonas con potencial de recarga hídrica, existen los jardines de lluvia, que simplemente es una estrategia que busca de manera artificial la recarga del acuífero.

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

CONCLUSIONES

Mediante la presente revisión bibliográfica se evidencio un gran número de metodologías para identificar zonas potenciales para recarga hídrica de aguas subterráneas. Por lo general, estas metodologías son de tipo cualitativo o cuantitativo. Es importante mencionar que, las variables para realizar dicha identificación, son similares en todas las metodologías, la diferencia esta en como cada autor le da el manejo a cada variable, las cuales son: tipo de suelo, tipo de roca, profundidad de la raíz, pendiente, cobertura vegetal, evapotranspiración, precipitación y escorrentía. Las metodologías más utilizadas son: Balance de agua, trazadores o isotopos, RAS, balance hídrico del suelo, método participativo; a esto se le suma ecuaciones como la de Schosinsky Nevermann y Schosinky y Losilla. Es de recalcar que las ya citadas metodologías no son las únicas, existen otras metodologías pero que son poco usadas.

De igual manera, se hallo un gran número de investigaciones o trabajos para identificar las zonas con potencial de recarga hídrica, una gran variedad en países de Centro de América, como es Panamá, Costa Rica, Nicaragua, Guatemala, El Salvador y la Isla de Cuba. Situación contraria con Colombia, solo se identificaron los siguientes trabajos relacionados con el tema: determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fe de Antioquia, ejecutado por la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín, identificación de zonas de recarga en La Primavera, departamento del Vichada, elaborado por la Universidad de Pamplona - sede Pamplona, Norte de Santander, recarga artificial de acuíferos mediante jardines de lluvia en el eje cafetero de Colombia, realizado por la Universidad Tecnológica de Pereira y métodos para determinar la recarga en acuíferos, realizado por la Universidad Nacional de Colombia -sede Medellín. Es de recalcar que, en el Estudio Nacional del Agua 2018 afirma que el nivel de conocimiento hasta el momento alcanzo un incremento del 14.07%, es decir, en general se tiene

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

un incremento del 30.8% de sistemas de acuíferos identificados (IDEAM, 2019), más aún no hace referencia de las zonas con potencial de recarga hídrica, siendo así, se trae a colación lo dicho por Guerreo (2006) donde afirma que el agua subterránea es un recurso ignorado o pobremente conocido.

En Colombia se debe realizar con más frecuencias estudios de identificación de recarga hídrica en aquellos sistemas de acuíferos que ya ha sido identificados, pero teniendo en cuenta a la comunidad de la zona, es decir, un trabajo interdisciplinario entre el conocimiento técnico y científico como el conocimiento local, de esta manera se podrá ir avanzando en dicho tema para posteriormente emplear estrategias de conservación y protección, en pocas palabras, generando una buena gestión de cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Como primera medida a Dios, por regalarme la fortaleza y sabiduría necesaria para afrontar este reto y terminarlo de una buena manera. Seguidamente al apoyo incondicional de mis padres, que siempre estuvieron en esos momentos complejos durante el desarrollo de mis estudios. De igual forma, a mis amigos que de alguna u otra manera hicieron parte de este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blanco, H (2009). *Identificación y manejo de las áreas de recarga hídrica en la parte media – alta de las microcuencas Palo, Marin y San Rafaelito* (Tesis de Maestría).
Universidad Estatal a distancia, San José, Costa Rica

Custodio, E. y Herrera, C. (2000). Utilización de la relación Cl/Br como trazador hidrogeoquímico en hidrología subterránea. *Boletín Geológico y Minero*. Recuperado de https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=identificaci%C3%B3n+de+la

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

+relaci%C3%B3n+Cl%2FBr+como+trazador+hidrogeoqu%C3%ADmico+en+hidrología
+subterránea+&btnG=

Donis, L. (2015). *Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del Río Negro, ciudad de Guatemala sistematización de práctica profesional* (Tesis de pregrado).

Recuperado de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2015/06/15/Donis-Luisa.pdf>

Dourojeanni, A; Jouravlev, A. 1999. Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos.

Santiago, CL, CEPAL. 181 p.

Faustino, J. 2006. Curso de Postgrado “Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica” [Notas de clase]. San Salvador, SV, CATIE. 113 p, citado por Matus, Oscar, Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: aplicación práctica en la subcuenca del Río Jucuapa, Nicaragua / Oscar Matus, Jorge Faustino y Francisco Jiménez. 1 ed.-Turrialba, C.R : Asdi ; CATIE, 2009. 40 p. : il. - (Serie técnica. Boletín técnico / CATIE ; No.38).

Figueredo, J. (2016). Identificación de zonas de recarga en La Primavera, Vichada. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*. Recuperado de

<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/memorias/article/view/1495/1801>

Flores, S. y Ruíz, J. (julio – septiembre de 1998). Estimación de la humedad del suelo para maíz

de temporal mediante un balance hídrico. *Terra Latinoamericana*. Recuperado de

https://scholar.google.com.mx/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=ESTIMACION+DE+L+A+HUMEDAD+DEL+SUELO+PARA+MAIZ+DE+TEMPORAL+MEDIANTE+UN+BALANCE+HIDRICO+&btnG=

Forges 2005. Método RAS para determinar la recarga de aguas subterráneas. San Salvador, El

Salvador. 40 p

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

Gómez, M. (2015). *Recarga artificial de acuíferos mediante jardines de lluvia en el Eje Cafetero colombiano* (Tesis de Maestría). Recuperado de

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/5587>

Gonzáles, W. (2011). *Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá* (Tesis de Maestría).

Recuperado de <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/2932>

Guerrero, A (abril de 2006). Políticas y Gestión del Agua Subterránea en Colombia. En J Zúñiga (Presidencia), *II Congreso colombiano de hidrogeología*, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Guzmán, A. y Hernández, A. (2007). Identificación de las áreas de recarga acuífera y zonas de protección de los manantiales del cantón central de Cartago. Recuperado de

<http://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/AnaGuzman-ArnulfoDiaz.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2019). *Estudio Nacional de Agua 2018*. Recuperado de

http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA_2018.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2015). *Estudio Nacional de Agua 2014*. Recuperado de

http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

Kendall, G. y Caldwell, E. (1998). *Fundamentos de la geoquímica de isótopos*. Elsevier.

Recuperado de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444815460500094>

Matus, O. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del*

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

- rio Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua* (Tesis de Maestría). Recuperado de http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3299/Elaboracion_participativa_de_una_metodologia.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Matus, O., Faustino, J. y Jiménez, F. (diciembre de 2008). Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. Validación en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. *Recursos Naturales y Ambiente*. Recuperado de <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/7308>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013). *Decreto 953 del 17 de mayo de 2013 por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Mora, L. y Ruiz, J. (2018). Determinación de áreas de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Frijoles y Guacalito, Upala, Costa Rica. *Repertorio científico*, 21(2), 23-36. Recuperado de <https://doi.org/10.22458/rc.v21i2.2407>
- Noriega, J. (2005). *Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural en la microcuenca del Río Sibaca, Chinique, Quiché* (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=FAUSAC.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=016809>
- Rodríguez, D. y Pérez, P. (septiembre de 2014). Determinación de la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara, de Cuba. *Aqua-LAC*. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000230973>

MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

Schosinsky, G. (2006). Cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*. Recuperado de

http://www.geologia.ucr.ac.cr/revista/revista/pdf_frameset.html

Vélez, M. y Vásquez, L. (2004, 17 de septiembre). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Avances en recursos hidráulicos*. Recuperado de

<http://www.bdigital.unal.edu.co/6105/>

Vélez, M. y Rhenals, R. (2008). Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fe de Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*. Recuperado de

<http://bdigital.unal.edu.co/14888/>