



La Ley de Darcy

Fundamentos del flujo subterráneo en medios porosos

Apellidos, nombre	Rodrigo Clavero, María Elena (marodcla@upv.es) Rodrigo Ilarri, Javier (jrodrigo@upv.es) Cassiraga, Eduardo (efc@dihma.upv.es)
Departamento	Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Centro	Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos

1 Resumen de las ideas clave

Este artículo docente presenta la Ley de Darcy, principio fundamental que describe el movimiento del agua en medios porosos saturados, como los acuíferos. Se expone su origen histórico en el contexto del abastecimiento urbano en el siglo XIX, su formulación matemática y las condiciones bajo las cuales resulta válida. Además, se introducen conceptos clave como el gradiente hidráulico, la velocidad de filtración y la velocidad real del agua subterránea. Esta ley, aún vigente desde su formulación, constituye el pilar de la hidrogeología cuantitativa y es una herramienta imprescindible para la gestión y estudio de los recursos hídricos en el subsuelo.

2 Objetivos

Al finalizar el estudio de este artículo, el alumno será capaz de:

- Comprender el contexto histórico y físico de la Ley de Darcy.
- Interpretar y aplicar su formulación matemática en medios porosos saturados.
- Distinguir entre velocidad de filtración y velocidad real.
- Relacionar la ley con los parámetros hidrogeológicos fundamentales.
- Evaluar las condiciones bajo las cuales la Ley de Darcy es válida.

3 Introducción

El agua subterránea representa una de las principales fuentes de agua dulce accesible en el planeta. El movimiento del agua en el subsuelo no sigue caminos evidentes ni visibles como en los ríos. Circula lentamente a través de los poros y grietas de suelos y rocas, invisible pero fundamental para el abastecimiento humano, la agricultura y el equilibrio de los ecosistemas.

En 1856, el ingeniero francés Henry Darcy formuló una ley empírica que describe cómo se mueve el agua en medios porosos. A partir de un experimento con columnas de arena, estableció una relación directa entre el caudal de agua, la geometría del medio y la diferencia de energía hidráulica entre dos puntos. Esta ley, hoy conocida como Ley de Darcy, ha sido validada y aplicada con éxito en hidrogeología, ingeniería civil y ciencias ambientales, y constituye la base para el diseño de captaciones, la simulación de flujos en acuíferos o el estudio del transporte de contaminantes.

4 Contexto histórico

La Ley de Darcy debe su nombre a Henry Philibert Gaspard Darcy (1803–1858), un ingeniero civil francés que dejó una huella imborrable en la historia de la ingeniería hidráulica y la hidrogeología. Formado en la *École des Ponts et Chaussées*, Darcy dedicó gran parte de su carrera al desarrollo de sistemas de abastecimiento urbano de agua, un desafío crucial para la salud pública de las ciudades europeas del siglo XIX.

En 1855, mientras trabajaba en un ambicioso proyecto de abastecimiento para la ciudad de Dijon, Darcy diseñó un sistema de captación y filtración basado en el transporte de agua

desde una fuente remota mediante un acueducto subterráneo. Como parte del diseño de los filtros de arena, realizó experimentos en laboratorio para comprender el comportamiento del flujo de agua a través de medios granulares saturados.

**¿Sabías
qué...?**

La Ley de Darcy fue originalmente desarrollada para diseñar filtros de arena para abastecimiento urbano, y no para estudiar acuíferos.

A pesar de ello, hoy es una de las leyes más utilizadas en hidrogeología. También se aplica en campos tan diversos como la ingeniería petrolera, la geotermia, la agricultura o la gestión de residuos.

En 1856 publicó su obra *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon* (Imagen 1), una extensa monografía dedicada al diseño y gestión del abastecimiento de agua de la ciudad. En uno de los apéndices finales de esta obra, Darcy describió los experimentos realizados en laboratorio que lo llevaron a formular la ley que lleva su nombre. Ese breve anexo, pese a su apariencia secundaria dentro de un tratado hidráulico mayor, puede considerarse el acto fundacional de la hidrogeología como ciencia, ya que proporcionó por primera vez una formulación físico-matemática rigurosa del flujo del agua subterránea en medios porosos.



LES FONTAINES PUBLIQUES

DE LA VILLE DE DIJON

EXPOSITION ET APPLICATION

DES PRINCIPES A SUIVRE ET DES FORMULES A EMPLOYER

DANS LES QUESTIONS

DE

DISTRIBUTION D'EAU

OUVRAGE TERMINÉ

PAR UN APPENDICE RELATIF AUX FOURNITURES D'EAU DE PLUSIEURS VILLES

AU FILTRAGE DES EAUX

ET

A LA FABRICATION DES TUYAUX DE FONTE, DE PLÔME, DE TOLE ET DE MITON

PAR

HENRY DARCY

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSEES.

La science qu'on appelle hydraulique est une science qui s'applique à la plus grande des choses d'une ville, à l'eau, et c'est à quoi les magistrats et les citoyens ont le plus grand intérêt. C'est pourquoi j'ai écrit ce livre, et j'espère qu'il sera utile à la science, et à la pratique. C'est tout ce que je demande.

On trouve, dans l'Annuaire de la ville de Dijon, 1856, p. 331.

PARIS

VICTOR DALMONT, ÉDITEUR,

Successeur de Carlier Gossy et 1^{er} Dalmont,

LIBRAIRE DES CORPS IMPÉRIAUX DES PONTS ET CHAUSSEES ET DES MINES,
Quai des Augustins, 49.

1856

Imagen 1. Henry Darcy y portada de su obra *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*

Aunque en un principio su finalidad era resolver un problema de ingeniería urbana, la formulación de Darcy resultó ser de gran aplicabilidad general. Su ley fue posteriormente formalizada en términos matemáticos y extendida a múltiples contextos por científicos como Jules Dupuit y M. Forchheimer. Con el tiempo, se convirtió en el principio fundamental para describir el flujo de agua en medios porosos, como los acuíferos.

5 La Ley de Darcy

5.1 Fundamentos físicos

El flujo de agua en medios porosos saturados está gobernado por diferencias de energía entre distintos puntos del subsuelo. Esta energía, expresada en términos de carga hidráulica total o altura piezométrica, combina componentes de presión y posición (energía potencial gravitatoria). El agua subterránea fluye desde zonas de mayor carga hacia zonas de menor carga, de forma análoga a como fluye la corriente eléctrica por una diferencia de potencial.

Los ensayos realizados por Darcy consistieron en hacer circular agua a través de columnas verticales de arena, sometidas a distintos gradientes hidráulicos, y medir el caudal de salida en cada caso. A partir de los resultados experimentales, observó que el caudal era directamente proporcional a la diferencia de carga hidráulica entre los extremos de la columna y al área de la sección transversal del flujo, e inversamente proporcional a la longitud del medio poroso atravesado.

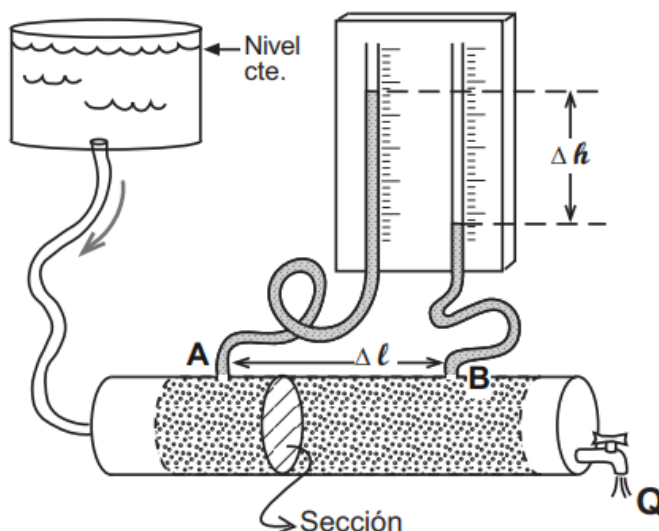


Imagen 2. Permeámetro de carga constante (Sánchez, 2022)

Basándose en estas observaciones, Darcy formuló una ley empírica que establece una relación entre el caudal de agua que atraviesa un medio poroso saturado, el gradiente hidráulico que lo impulsa y las propiedades hidráulicas del propio medio:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

Ecuación 1. Ley de Darcy

donde Q es el caudal de agua (m^3/s); K es la conductividad hidráulica del medio (m/s); A es el área transversal del flujo (m^2) y $\Delta h/\Delta L$ es el gradiente hidráulico (adimensional)

El signo negativo en la fórmula de Darcy es de gran importancia conceptual. Indica que el flujo se produce en la dirección de carga hidráulica decreciente, es decir, desde un punto de mayor energía hidráulica hacia uno de menor energía. Se trata de una convención coherente con el sistema de referencia positivo definido habitualmente en matemáticas y

física. Si consideramos el gradiente como un cambio positivo de carga hacia arriba, el flujo se produce en sentido contrario. Por tanto, el signo negativo no representa un caudal negativo, sino simplemente la dirección física del flujo: el agua fluye “cuesta abajo” en términos de energía hidráulica.

Este principio se basa en el flujo laminar a través de un medio poroso homogéneo y completamente saturado. Su sencillez no impide que sea una herramienta de enorme potencia analítica y predictiva en hidrogeología.



Ejercicio rápido

En un acuífero con $K=3 \times 10^{-4}$ m/s, $A = 40$ m² y gradiente hidráulico 0.02, ¿qué caudal puede atravesar el medio poroso? ¿Qué ocurriría con el caudal si el gradiente se duplica? ¿Y si se reduce a la mitad?

Solución: $Q = 2,4 \times 10^{-4}$ m³/s. El caudal es directamente proporcional al gradiente hidráulico, como se deduce de la Ley de Darcy.

5.2 Velocidad de filtración y velocidad real

En hidrogeología, no solo interesa conocer el caudal que fluye a través de un acuífero, sino también la velocidad con la que el agua se desplaza. Para ello, a partir de la Ley de Darcy se definen dos conceptos fundamentales: la velocidad de flujo, velocidad de Darcy o flujo específico y la velocidad de filtración, velocidad intergranular o velocidad real del flujo.

La **velocidad de flujo** se obtiene al dividir el caudal de agua entre el área de sección transversal por la que fluye el agua. Su unidad es metros por segundo (m/s). A partir de la Ley de Darcy, se expresa así:

$$q = \frac{Q}{A} = -K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

Ecuación 2. Velocidad de flujo

Esta expresión permite calcular la velocidad media del flujo de agua considerando el total del volumen del medio poroso, incluyendo tanto los poros como la matriz sólida. Es decir, no representa la velocidad real del agua a través de los poros, sino un promedio espacial simplificado.

En realidad, el agua se mueve exclusivamente por los poros interconectados del medio. Por tanto, la **velocidad real** del agua (expresada también en m/s) es mayor que la de Darcy, ya que el caudal se distribuye únicamente a través del volumen poroso efectivo.

Para obtenerla, se divide la velocidad de flujo entre la porosidad efectiva del material (n_e), que es adimensional:

$$v = \frac{q}{n_e}$$

Ecuación 3. Velocidad real del flujo

Este valor representa mejor la velocidad de desplazamiento real de un contaminante, de un trazador o del propio frente de agua en el acuífero. Es una variable crítica en estudios de transporte y en la estimación de tiempos de tránsito.



Ejercicio rápido

En dos acuíferos distintos se ha calculado la velocidad de flujo y se conoce su porosidad eficaz:

- Acuífero A: $q = 5 \times 10^{-6}$ m/s, $n_e = 0.25$
- Acuífero B: $q = 1.5 \times 10^{-6}$ m/s, $n_e = 0.10$

¿Cuál de los dos acuíferos tiene mayor velocidad real del agua?

¿Qué conclusiones puedes sacar sobre la relación entre porosidad y tiempo de tránsito?



Reflexiona

Imagina que dos acuíferos distintos tienen la misma porosidad efectiva, pero uno tiene una conductividad hidráulica mucho mayor. Si ambos presentan el mismo gradiente hidráulico, ***¿cómo variará el caudal y la velocidad real del agua?***

¿Cómo influye esto en la velocidad de propagación de un contaminante o en el diseño de un pozo de captación?

5.3 Validez de la Ley de Darcy

La Ley de Darcy es una formulación empírica que ha demostrado una extraordinaria utilidad en hidrogeología. Sin embargo, como toda ley basada en la observación experimental, su aplicabilidad está condicionada por ciertos supuestos y límites físicos.

En primer lugar, la Ley de Darcy supone que **el flujo del agua a través del medio poroso es laminar**. Esto significa que el movimiento del agua se produce de manera ordenada, sin turbulencias, y que las fuerzas viscosas del fluido dominan sobre las inerciales. Este tipo de flujo es característico de medios de baja permeabilidad y velocidades bajas, y se puede verificar mediante el número de Reynolds adaptado a medios porosos. Para que el régimen sea laminar, el valor de este número debe ser inferior a 1–10. En materiales muy permeables, como las gravas gruesas o los sistemas fracturados con canales amplios, este umbral puede superarse fácilmente, lo que indicaría un flujo no darciano.

Además, la ley fue formulada para **medios porosos completamente saturados**. Es decir, todos los poros deben estar ocupados por agua. Cuando el medio se encuentra parcialmente saturado, como en la zona no saturada situada por encima del nivel freático, el comportamiento del flujo se vuelve no lineal y más complejo, siendo necesario recurrir a formulaciones adicionales.

Otro aspecto relevante es que Darcy formuló su ley para **medios homogéneos e isótropos**, lo que implica que las propiedades hidráulicas del terreno (como la conductividad hidráulica) son constantes en todas las direcciones y localizaciones. Sin embargo, en la práctica, muchos acuíferos presentan heterogeneidades espaciales o anisotropía hidráulica.

En estos casos, la Ley de Darcy puede seguir aplicándose si se consideran promedios representativos o se adapta a un sistema coordinado con componentes de conductividad distintas en cada dirección. En medios altamente heterogéneos, como acuíferos fracturados o kársticos, donde el agua fluye a través de fisuras, tubos o canales preferenciales, el flujo se comporta de forma muy diferente y la ley pierde buena parte de su validez. En estos contextos, se requieren modelos específicos, como los de flujo dual o redes de conductos.

Finalmente, la Ley de Darcy es aplicable cuando los **gradientes hidráulicos son moderados**. En condiciones donde el gradiente es muy elevado, como puede ocurrir cerca de pozos con bombeo intensivo o durante la inyección forzada de fluidos, pueden aparecer fenómenos no lineales, y el flujo dejar de seguir la ley lineal de Darcy. En estas situaciones, se recurre a modelos extendidos como la ley de Forchheimer, que introduce términos cuadráticos en la ecuación para tener en cuenta las pérdidas adicionales de energía.



Se descubre un acuífero con alta heterogeneidad, grandes diferencias de granulometría y presencia de capas semiconfinantes.

*¿Crees que sería correcto aplicar directamente la Ley de Darcy para estimar caudales?
¿Qué limitaciones o precauciones deberías tener en cuenta? ¿En qué casos podría ser necesario recurrir a modelos más complejos?*

Por tanto, la Ley de Darcy es válida y precisa cuando el flujo es laminar, el medio está saturado y las propiedades del terreno pueden considerarse homogéneas y constantes. Cuando estas condiciones no se cumplen, su aplicación directa puede llevar a errores significativos, por lo que se deben utilizar alternativas teóricas o numéricas más adecuadas.

6 Conclusiones

La Ley de Darcy constituye el fundamento esencial para comprender el comportamiento del flujo de agua en medios porosos saturados. Desde su formulación experimental por Henry Darcy en el siglo XIX, esta ley ha sido la piedra angular de la hidrogeología. Su simplicidad y capacidad predictiva la han convertido en una herramienta indispensable en la caracterización de acuíferos, el diseño de obras hidráulicas subterráneas y el estudio del transporte de solutos y contaminantes. Aunque su aplicación está limitada a condiciones de flujo laminar, medios saturados y homogéneos, su versatilidad permite adaptaciones en contextos más complejos mediante modelos extendidos.

Comprender la Ley de Darcy no solo permite realizar cálculos de caudales o velocidades, sino también construir un modelo conceptual robusto del comportamiento del agua subterránea.

7 Bibliografía

Custodio, E.; Llamas, M.R.: "Hidrología Subterránea", Ed. Omega, 1996.

Fetter, C.W.: "Applied Hydrogeology", Ed. Prentice Hall, 2001.

Freeze, R.A.; Cherry, J.A.: "Groundwater", Ed. Prentice-Hall, 1979. Disponible en:
<https://gw-project.org/books/groundwater/>

Sánchez, F. J.: "Hidrología Superficial y Subterránea". 2ª ed. Kindle Direct Publishing, 2022.

U.S. Geological Survey, USGS. (2024). Groundwater basics. Disponible en:
<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/groundwater>