



UNAP



**FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

EXAMEN DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**CIRCULACIÓN DE FLUIDOS A TRAVÉS DE LECHOS
POROSOS, FLUIDIZACIÓN; LEY DE DARCY**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**PRESENTADO POR:
ALAN FLORES TUANAMA**

**ASESOR:
Ing. ELMER TREVEJO CHAVEZ, MSc.**

**IQUITOS, PERÚ
2022**



UNAP

FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Escuela Profesional de
Ingeniería en Industrias Alimentarias

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DEL EXAMEN DE SUFICIENCIA PROFESIONAL N° 021-
CGT-FIA-UNAP-2022**

En Iquitos, en las instalaciones del laboratorio de ingeniería, ubicado en la Planta Piloto, sito Av. Freyre N° 610, a los 10 días del mes de mayo de 2022, a horas 18:15, se dió inicio a la sustentación pública del informe del examen de suficiencia profesional titulado: **“CIRCULACIÓN DE FLUIDOS A TRAVÉS DE LECHOS POROSOS, FLUIDIZACIÓN; LEY DE DARCY”** presentado por el (la) Bachiller **ALAN FLORES TUANAMA**, de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias; para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) en Industrias Alimentarias, que otorga la Universidad de acuerdo a Ley y Estatuto.

El Jurado Calificador y dictaminador designado mediante Resolución Decanal N° 0178-FIA-UNAP-2022 del 02 de mayo de 2022, está integrado por:




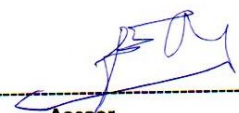
Ing. CARLOS ENRIQUE LÓPEZ PANDURO, MSc.
Ing. JUAN ALBERTO FLORES GARAZATUA, Mtro.
Lic. MIRIAM RUTH ALVA ANGULO, Mgr.

Luego de haber escuchado con atención y formulado las preguntas necesarias, las cuales fueron respondidas: ACERTADAMENTE

El Jurado después de las deliberaciones correspondientes, llegó a las siguientes conclusiones:

La sustentación pública y el informe del examen de suficiencia profesional, según promedio final, ha sido: APROBADO con la calificación BUENA

Estando el (la) bachiller apto(a) para obtener el Título Profesional de Ingeniero(a) en Industrias Alimentarias, Siendo las 19:15 se dió por terminado el acto de sustentación.

 ----- Presidente Ing. CARLOS ENRIQUE LÓPEZ PANDURO, MSc. CIP: 31070	 ----- Miembro Ing. JUAN ALBERTO FLORES GARAZATUA, Mtro. CIP: 31646
 ----- Miembro Lic. MIRIAM RUTH ALVA ANGULO, Mgr. CNP: 130	 ----- Asesor Ing. ELMER TREVEJO CHAVEZ, Mgr. CIP: 18493



MIEMBROS DEL JURADO

Examen de suficiencia profesional aprobada sustentación pública en la ciudad de Iquitos en las instalaciones del laboratorio de ingeniería de alimentos ubicado en la avenida Augusto Freyre N°610, Planta Piloto de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, llevado a cabo 10 de mayo del 2022, siendo, 6:15 pm del día martes, siendo los miembros del jurado calificador los abajo firmantes.



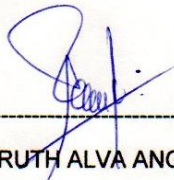
Ing. CARLOS ENRIQUE LÓPEZ PANDURO MSc

Presidente



Ing. JUAN ALBERTO FLORES GARAZATUA Mgr

Miembro



Lic. MIRIAM RUTH ALVA ANGULO Mgr

Miembro

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado para mi Familia y hermanos e Hijo quienes me apoyaron incondicionalmente dándome la fortaleza para alcanzar las metas y objetivos trazados que tuvo lugar desde mucho tiempo, a quienes les tengo estima personal y familiar, los mismo que me alentaron a continuar sin pensar en las adversidades presentes en su momento, el profesional que hoy en día ostento se les debo, gracias, muchas gracias...

ALAN FLORES TUANAMA Y PRICE LIAM FLORES M.

—

AGRADECIMIENTO

Por mi posición católica, a Dios por darme la vida, acompañarme en todo momento proporcionándome la energía espiritual para no desviarme del objetivo y permitir concluir satisfactoriamente mis estudios, cumpliéndose con éxito la meta trazada.

A la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana y Facultad de Industrias Alimentarias por brindarme la oportunidad de orientarme, constituirme y formarme como profesional esta hermosa especialidad.

A mis docentes quienes me transmitieron, proyectaron y brindaron sus experiencias y conocimientos para ser el profesional que ostento.

ALAN FLORES TUANAMA Y PRICE LIAM FLORES M.

ÍNDICE GENERAL

PORTADA	i
ACTA DE SUSTENTACION	ii
MIEMBROS DEL JURADO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
INDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ABREVIATURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	2
1.1.1 Hidráulica	2
1.1.1.1 MECÁNICA DE FLUIDOS.	2
1.1.1.2 FLUJO DE AGUA	2
1.1.1.3 EL MEDIO POROSO	2
1.1.1.4 FLUJO EN MEDIO POROSO	3
1.1.1.4.1 FLUJO LAMINAR	3
1.1.1.4.2 FLUJO TURBULENTO	3
1.2 LEY DE DARCY	4
1.2.1 NÚMERO DE REYNOLDS	5
1.2.2 LEY DE HAGEN-POISEUILLE	7
1.2.3 CONDICIONES DE APLICACIÓN DE LA LEY DE DARCY	8
1.2.4 CRITERIOS PARA ESTABLECER EL FLUJO LAMINAR	10
1.2.4.1 PERMEABILIDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	10
1.2.4.2 CIRCULACIÓN DE FLUIDOS A TRAVÉS DE LECHOS POROSOS Y TORTAS	14
1.2.4.2.1 VELOCIDAD MEDIA SUPERFICIAL Y VELOCIDAD	

MEDIA REAL DE UN FLUIDO	14
1.2.4.2.2 DEFINICIÓN DE LECHO FLUIDIZADO	15
1.2.5 CARACTERÍSTICA DE LAS PARTÍCULAS	16
1.2.5.1 POROSIDAD DEL LECHO (ϵ)	16
1.2.5.2 ESFERICIDAD (Φ)	16
1.2.5.3 DIÁMETRO DE LA PARTÍCULA	16
1.2.5.4 DENSIDAD DE LA PARTÍCULA (P_P)	16
1.2.5.5 ÁREA SUPERFICIAL (A)	17
1.2.5.6 CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS	17
1.2.6.5 VELOCIDADES RELACIONADAS EN UN LECHO FLUIDIZADO	18
1.2.6.1 VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL GAS (U_0)	18
1.2.6.2 VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN	19
CAPÍTULO II: CONCLUSIONES	21
CAPÍTULO III: RECOMENDACIONES	22
CAPÍTULO IV: FUENTES DE INFORMACIÓN	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidad de caída de las partículas en relación a su diámetro.	1
Tabla 2. Métodos estandarizados por ASTM para pruebas de permeabilidad en suelos.	2

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de flujo: laminar y turbulento	3
Figura 2. Experimento de Henry Darcy.	4
Figura 3. El diámetro hidráulico se define de tal modo que se reduce a diámetro común para tubos circulares.	5
Figura 4. Representación de la Ley de Hagen-Poiseuille	6
Figura 5. Equipo usado por Henry Darcy en sus experimentos.	7
Figura 6. Clasificación de las partículas de Geldart	8

RESUMEN

Del presente trabajo se da a conocer la gran versatilidad y amplio uso de la Ley de Darcy la cual mediante representación matemática permite su uso en diversas áreas, permitiendo conocer el comportamiento fluidinámico del fluido pudiendo ser este un gas o líquido.

Este principio se puede se puede aplicar a partículas inertes presentes en los suelos, arena, grava, así como también a lechos conformados por partículas biológicas como pueden ser granos de cereales, frutos cualquiera sea su forma geométrica, empleando el método de secado por fluidización manteniendo los parámetros constantes para no provocar daños considerables en el producto terminado. El desarrollo de la región en relación a la industria alimentaria, posee un potencial, desestimado por motivos de los costos de producción y la falta de valor agregado de los tubérculos amazónicos, la operación de circulación de fluido a través de lecho poroso – fluidizado, es la alternativa idónea para impulsar el desarrollo por medio de obtención de harinas sucedáneas, que ello se acapararía el sector molinero, panificación, cereales, hojuelas, entre otros, que proporcionarían el desarrollo sostenible y viable en la región Loreto.

Palabra clave: circulación fluida, lecho poroso, fluidización.

ABSTRACT

The present work reveals the great versatility and wide use of Darcy's Law, which through mathematical representation allows its use in various areas, allowing to know the fluid dynamic behavior of the fluid, which can be a gas or liquid.

This principle can be applied to inert particles present in soils, sand, gravel, as well as to beds made up of biological particles such as cereal grains, fruits whatever their geometric shape, using the fluidization drying method maintaining constant parameters so as not to cause considerable damage to the finished product. The development of the region in relation to the food industry, has a potential, dismissed for reasons of production costs and the lack of added value of the Amazonian tubers, the operation of fluid circulation through porous - fluidized bed, is the ideal alternative to promote development by obtaining substitute flours, which would monopolize the milling sector, baking, cereals, flakes, among others, which would provide sustainable and viable development in the Loreto region.

Keywords: Amazon tuber, fluid circulation, porous bed, fluidization.

INTRODUCCIÓN

La operación unitaria de fluidización consiste en la circulación de fluido de aire de caliente a temperatura y presión constante a través de un lecho poroso el mismo que será sometido a fuerzas de fricción por el mismo según las características del proceso.

El estudio de lechos constituidos por partículas en estado de reposo formando un lecho poroso es bien explicado por La ley de Darcy que enfoca muy bien los mecanismos físicos que intervienen y como interactúan con las características propias del material filtrante como son el tamaño de partícula, esfericidad, permeabilidad, etc.

Esta ley se aplica con diferentes áreas como son la física, geología, minas, tratamientos de aguas, transporte de aguas por canales, etc.

CAPÍTULO I:

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 HIDRÁULICA

Vargas E (2011) define un concepto de hidráulica relacionando el estado del fluido y la ciencia que lo esté empleando, en la mecánica de los fluidos se definiría como la parte de la física que estudia el comportamiento de los fluidos, si el fluido fuera un líquido aceitoso se emplearía el termino de oleo hidráulica. Para los términos de hidrostática lo define como ente rector que rige a los fluidos en su estado de reposo y la hidrodinámica trata sobre las leyes que rigen sobre los fluidos en movimiento.

1.1.1.1 MECÁNICA DE FLUIDOS.

Las aplicaciones de la mecánica de fluidos son tan diversas que se subdivide en dos campos principales: la estática de fluidos o hidrostática que se ocupa de los fluidos en estado de reposo y la dinámica de fluidos que trata de los fluidos en movimiento. El estudio de los gases fundamentalmente con velocidades bajas es estudiado por la hidrodinámica y la aerodinámica se enfoca en gases circulando a alta velocidad y con grandes presiones, Vargas E (2011).

1.1.1.2 FLUJO DE AGUA

Vargas E (2011) hace referencia de que el agua es uno de los fluidos más importantes en las industrias por lo que controlar sus condiciones de desplazamiento y volumen es de suma importancia para ello se emplean instrumentos para la medición de los caudales tanto para líquidos y gases.

1.1.1.3 EL MEDIO POROSO

Santayana T (1981) citando a Scheidegger (1960) hace una diferencia entre “poro” y “medio poroso” indicando que los poros son los espacios vacíos de una cama o lecho conformado por partículas no necesariamente uniformes formando aberturas interconectadas entre si formando un medio poroso, señalando que las geometrías de las partículas generan vacíos y estos en relación con el volumen que ocupan se denomina “porosidad”.

1.1.1.4 FLUJO EN MEDIO POROSO

En su investigación Carrera M y Pacheco J (2012) indican que cuando están en movimiento dos partículas se generan fuerzas de fricción que actúan en forma tangencial a ellas y dependiendo del valor que tengan estas fuerzas las partículas se desplazarán linealmente o rotarán alterando su trayectoria desplazándose erráticamente generando turbulencia.

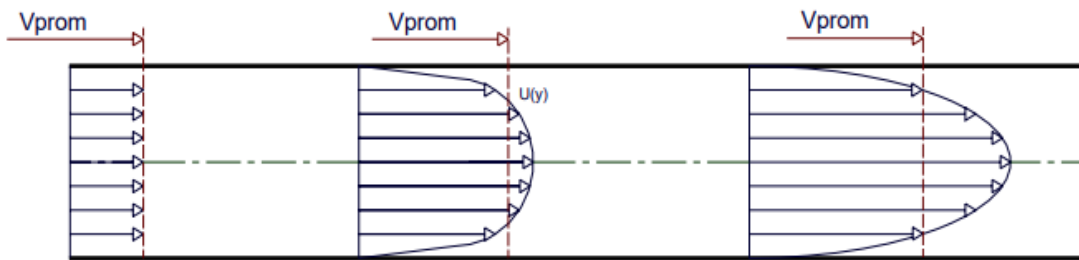


Figura 01: Tipos de flujo: laminar y turbulento

Fuente: Cengel (2006)

1.1.1.4.1 FLUJO LAMINAR

Este tipo de fluido se caracteriza por ser suave, moviéndose en laminas superpuestas sin entremezclarse, donde cada partícula sigue una línea de corriente, las velocidades de estas líneas son menores o iguales a 2300, superando este valor será turbulento, Carrera M y Pacheco J (2012).

1.1.1.4.2 FLUJO TURBULENTO

Este tipo de flujo se caracteriza por tener las fuerzas de inercia superior a las fuerzas viscosas generando turbulencia, Carrera M y Pacheco J (2012). La velocidad de las partículas está relacionada con su diámetro lo que determina en que régimen se encontrara, Sandoval (1993)

Tabla 01: Velocidad de caída de las partículas en relación a su diámetro.

Material	d (mm)	w (m/s)	Régimen de Contorno	
Arcilla	0.001	0.00000078	Laminar	
Limo	0.01	0.000078		
	0.05	0.00195		
Arena	0.10	0.01	Transición	
	0.50	0.06		
	1.00	0.12		
	1.50	0.17		
	2.00	0.21		
Grava	2.50	0.25	Turbulento	
	3.00	0.27		
	5.00	0.35		
	10.00	0.49		
	20.00	0.69		
	30.00	0.85		
	Cantos rodados	50.00		1.10
		100.00		1.55

1.2 LEY DE DARCY

La ley de Darcy esta siempre presente cuando se investiga lechos porosos, el cual es un factor determinante para el análisis de un fluido a través de un medio poroso. Desde muchos años atrás Darcy fue el encargado de diseñar la red de distribución de agua en su ciudad origen, trabajo que lo llevó a despertar su interés por el diseño de los filtros de arena, Gonzales G (2017).

Darcy observó que al pasar el agua por un medio poroso se presentaba una caída de presión lo llamo mucho su atención y empezó a estudiar este fenómeno. Midió el flujo de agua Q y la caída de presión Δh , que pasaba a través de una columna de arena de área transversal A .

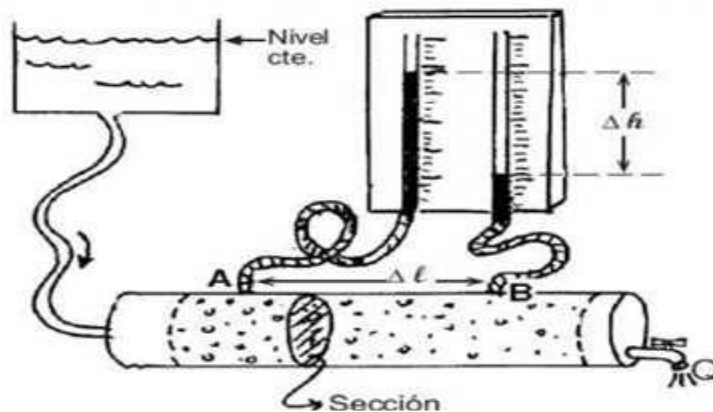


Figura 02: Experimento de Henry Darcy.

Obteniendo así, la siguiente relación:

$$\frac{Q}{A} \propto \frac{\Delta p}{L}$$

Donde el gasto por unidad de área, es proporcional al gradiente de presión. También se convenció de que la razón de proporcionalidad dependía directamente del tipo de medio poroso que se estuviera utilizando para hacer pasar el fluido, fue así como planteó la siguiente ecuación conocida en estos tiempos como la Ley de Darcy.

$$Q = KA \frac{\Delta p}{L}$$

1.2.1 Número de Reynolds

En sus observaciones sobre el desplazamiento de los fluidos Osborne Reynolds (1880) estableció que el cambio de estado está relacionado con la *geometría*, la *rugosidad de la superficie*, la *velocidad del flujo*, la *temperatura de la superficie* y el *tipo de fluido*, entre otros factores, posteriormente confirmó que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de *fuerzas inerciales* a *fuerzas viscosas* en el fluido. A esta razón se le conoce como Número de Reynolds y se expresa para flujo interno en una tubería circular, González G (2017).

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom}}{\nu} = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu}$$

Donde:

V_{prom} = Velocidad de flujo promedio (m/s),

D = longitud característica de la geometría (diámetro en este caso, en m)

$\nu = \mu/\rho$ = viscosidad cinemática del fluido (m²/s).

Note que el número de Reynolds es una cantidad *adimensional*. Además, la viscosidad cinemática tiene la unidad m²/s y se puede ver como *difusividad viscosa* o *difusividad de cantidad de movimiento*, Lambe T y Whitman R (2004).

A números grandes de Reynolds, las fuerzas inerciales, que son proporcionales a la densidad del fluido y al cuadrado de la velocidad del fluido, son grandes en relación con las fuerzas viscosas y por lo tanto las fuerzas viscosas no pueden evitar las aleatorias y rápidas fluctuaciones del fluido. Sin embargo, a número de Reynolds *pequeños* o *moderados*, las fuerzas viscosas son lo suficientemente grandes como para suprimir dichas fluctuaciones y mantener al fluido “en línea”. De esta manera el flujo es *turbulento* en el primer caso y *laminar* en el segundo. El número de Reynolds en donde el flujo se vuelve turbulento se llama número de Reynolds crítico, Re_{cr} . El valor del número de Reynolds crítico es diferente para geometrías y condiciones de flujo distintas. Para flujo interno en una tubería circular, el valor generalmente aceptado el número de Reynolds crítico es $Re_{cr} = 2300$.

Para flujo a través de tuberías no-circulares, el número de Reynolds se basa en el diámetro hidráulico D_h .

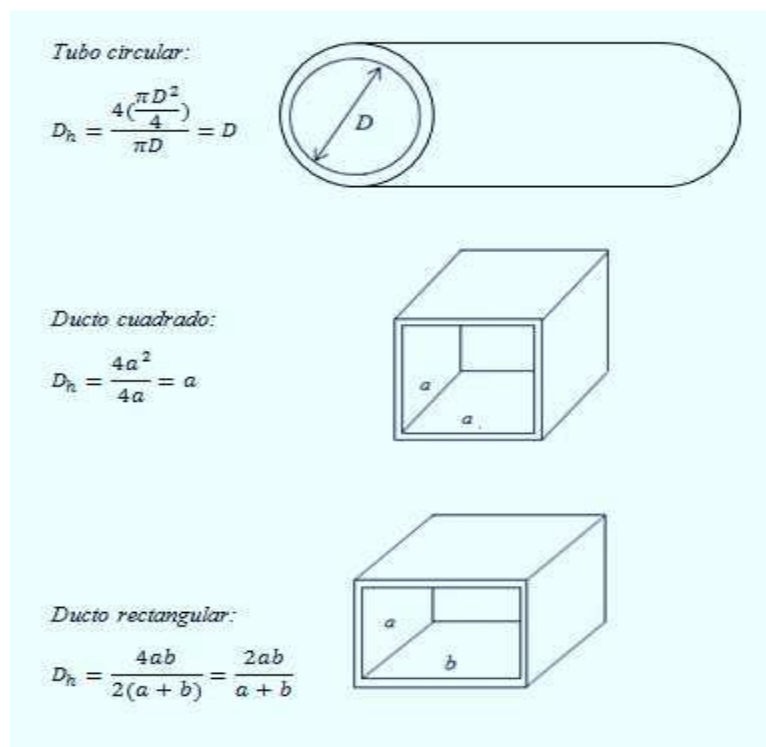


Figura 03: El diámetro hidráulico se define de tal modo que se reduce a diámetro común para tubos circulares.

Fuente: Lambe T y Whitman R (2004).

Diámetro hidráulico:

$$D_h = \frac{4A_c}{p}$$

Donde A_c es el área de sección transversal de la tubería y p es su perímetro húmedo. El diámetro hidráulico se define de modo que se reduce a diámetro común D para tuberías circulares:

Tubo circular:

$$D_h = \frac{4\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}{\pi D} = D$$

Lambe T y Whitman R (2004) manifiesta que es deseable tener valores precisos de número de Reynolds para flujos laminares, transicional y turbulento, pero éste no es el caso en la práctica. Se entiende que la transición de flujo laminar a turbulento también depende del grado de perturbación del flujo por la *rugosidad de la superficie*, las *vibraciones de la tubería* y las *fluctuaciones en el flujo*. En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería circular es laminar para $Re \lesssim 2300$, turbulento para $Re \gtrsim 4000$, y transicional entre ellos. Es decir :

$Re \lesssim 2300$ Flujo Laminar

$2300 \lesssim Re \gtrsim 4000$ Flujo Transicional

$Re \gtrsim 4000$ Flujo Turbulento

1.2.2 Ley de Hagen-Poiseuille

La ley de Poiseuille, también llamada de Hagen- Poiseuille, es una ley física formulada en el año 1849 concerniente al volumen de flujos estacionarios laminares o líquidos viscosos uniformes e incompresibles que pasa a través de un tubo cilíndrico.

El fluido es impulsado a través de un ducto largo, recto y rígido imponiendo una diferencia de presión de ambos extremos del medio. A su vez, esta ley describe la relación cuantitativa entre la geometría del ducto, la tasa de flujo, las propiedades físicas del fluido que atraviesa el ducto y la presión diferencial a lo largo del medio la cual provoca el movimiento del fluido.

La ecuación que define esta ley es:

$$Q = \frac{\pi R^4 |P_1 - P_2|}{8\mu L}$$

Dónde:

Q , es el flujo expresado en m^3 / s

v, es el volumen de un líquido transferido en tiempo t expresado en m^3

v, es la mediana de la velocidad expresada en m/s

x, es el vector de dirección del flujo expresado en m

R, es el radio interno del tubo dado en m

ΔP , la diferencia de presión entre las dos terminales expresadas en pa

μ , es la viscosidad dinámica del fluido escrito en $\left(\frac{kg}{m.s}\right) \times 10^{-5}$

L, la longitud del tubo escrita en metros.

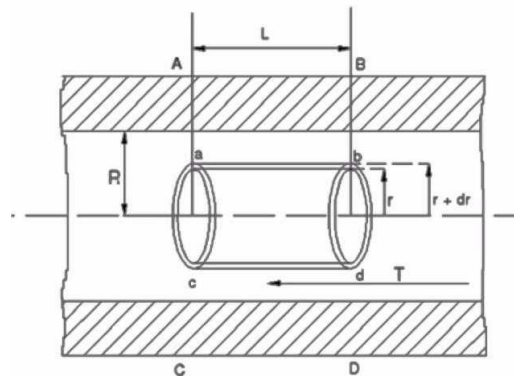


Figura 04: Representación de la Ley de Hagen-Poiseuille

1.2.3 Condiciones de aplicación de la Ley de Darcy

Hoyos et al, (2010) indican que para cumplir con establecer los límites de la ley de Darcy es conveniente definir las condiciones que deben cumplir los fluidos y los materiales empleados, así ellas no hayan sido planteadas en el enunciado original, y tales condiciones pueden resumirse como sigue:

1. El flujo que pasa a través del material poroso debe ser gravitacional. no se considera el flujo forzado por energía mecánica química, eléctrica, térmica o de otra naturaleza cualquiera.
2. Se debe asegurar que el flujo sea estacionario durante el proceso de flujo.

3. El medio permeable debe estar saturado, sin presencia de aire para evitar la condición de multifluido, o multifases asegurando la valoración de la permeabilidad y el movimiento del fluido por los poros del medio permeable.
4. La estabilidad del agua en los piezómetros se toma como indicador necesario suficiente para aceptar la condición de flujo laminar.
5. La relación lineal entre la velocidad de descarga y la pérdida de presión por unidad de longitud a través del material, se toma como indicativo de que el flujo a través del medio es laminar.
6. El medio permeable debe ser homogéneo e isotrópico, con el fin de permitir el análisis del flujo unidireccional.
7. Las características físicas y químicas de los medios deben permanecer constantes: el líquido no puede reaccionar con el medio, y la porosidad y la permeabilidad de este no deben cambiar durante el ensayo. Las reacciones químicas pueden dar lugar a cambios en la porosidad, ya sea por cementación o por disolución, y por lo tanto pueden cambiar la permeabilidad del medio. Junto con la aplicación de fuerzas externas, que dan lugar a cambios en la relación de vacíos.

De las condiciones anteriores, se establece, que la regla técnica de Darcy se aplica estrictamente sólo a un flujo laminar gravitacional, constante y sin ninguna variación de sus características físicas y químicas, donde el agua fluye a lo largo de conductos pequeños y sigue los principios generales de la hidráulica.

Como flujo gravitacional se entiende el producido exclusivamente por efecto de la atracción gravitacional. En caso de que la atracción gravitacional no sea suficiente para producir el flujo, es posible que éste ocurra por efecto de otros tipos de energía: mecánica, térmica, química, eléctrica, o de tensión superficial. En tales casos, los gradientes que deben considerarse no son estrictamente gradientes hidráulicos sino gradientes asociados al respectivo tipo de energía: térmicos, químicos, mecánicos que, en este último caso, pueden inducir modificaciones grandes en la relación de vacíos. La regla técnica de Darcy, de aplicarse en estos casos, sería por analogía y no de manera estricta, además debería hablarse de, coeficientes de permeabilidad específicos para cada energía de transporte o tipo de flujo. Así debería hablarse de permeabilidad osmótica, permeabilidad electro-osmótica, permeabilidad capilar, etc. (Hoyos et al, 2010).

1.2.4 CRITERIOS PARA ESTABLECER EL FLUJO LAMINAR

Para reconocer la condición de flujo laminar se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- i. Relación entre la velocidad y el gradiente hidráulico: se tomó como criterio para considerar el flujo laminar la linealidad matemática de la relación $v:i$. Dado el carácter experimental del trabajo, en el que no se espera una relación lineal perfecta, se acepta como criterio de relación lineal, valores del coeficiente de correlación que superen una confiabilidad de 98%.
- ii. Oscilaciones en los manómetros: En su Nota D del Apéndice de Historia de las Fuentes Públicas del Dijon, Henry Darcy hace referencia muy marcada en sus resultados sobre las oscilaciones en los manómetros utilizados, oscilaciones fuertes a muy fuertes marcaron el fin de la linealidad de la relación $v:i$. se tomó como criterio de la ocurrencia de flujo laminar la estabilidad del nivel del agua en los piezómetros, lo que permite a aceptar un flujo laminar en toda la extensión de los datos recogidos.
- iii. Número de Reynolds: No se considera en este trabajo el número de Reynolds como frontera del régimen laminar en los ensayos realizados, ya que se ha podido constatar con la revisión literaria, que estos límites para el flujo laminar, estimados en base al número de Reynolds, no están completamente definidos, o han sido definidos en forma vaga por una sola variable, la granulometría o características del material, de acuerdo con el planteamiento de este trabajo es claro que el flujo depende del Espesor del estrato, la granulometría y la carga hidráulica externa.

1.2.4.1 PERMEABILIDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Romaña J (2014) menciona que el concepto de permeabilidad es un concepto genérico que hace relación al paso de un material a través de otro. En geotecnia es más común el uso del concepto de conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad, el cual puede ser definido como la velocidad de descarga de agua en condiciones de flujo laminar a través de un área transversal unitaria de un medio permeable bajo un gradiente hidráulico unitario y en condiciones estándar de temperatura. Conviene distinguir entre la permeabilidad primaria, propia de un material, y característica de los materiales naturales, y la permeabilidad

secundaria, en la que el fluido se desplaza a lo largo de discontinuidades que es propia de materiales cohesivos y de macizos rocosos.

Ramírez et al, (2006) manifiesta que “La conductividad hidráulica es afectada por la textura y estructura del suelo, siendo mayor en suelos altamente porosos, fracturados o agregados y menor en suelos densos y compactados...”.

Diferentes profesiones como Ingenieros agrícolas, civiles y de petróleos, así como hidrogeólogos, han utilizado ampliamente la regla técnica de Darcy y han propuesto modificaciones relacionadas con las peculiaridades de su profesión, por su parte Terzaghi y Peck (1946) consideraron los efectos de la densidad y viscosidad de los fluidos e introdujeron el concepto de conductividad hidráulica, equivalente al concepto de permeabilidad, o coeficiente de permeabilidad en el informe de Darcy, diferente de la permeabilidad intrínseca (k); con estas afirmaciones Louis (1969) propuso una expresión racional para calcular la conductividad hidráulica de masas rocosas en función del espaciamiento y abertura de las discontinuidades.

Las investigaciones recientes han examinado el problema de la circulación de líquidos multifase (petróleo, agua y gas) a través de medios permeables (Brennen, 2005), la circulación de agua a través de suelos no saturados en función del contenido volumétrico de agua (Fredlund, 2000) y la resistividad hidráulica como una invariante hidráulica alternativa, útil en el análisis del flujo de fluidos a través de medios permeables (Hoyos, 2005, Romaña *et al*, 2008) y el umbral de carga hidráulica externa por debajo de la cual no ocurre el flujo (Hoyos,2006).

El aparato experimental de Darcy, que se muestra en la [figura 3-1](#), le permitió variar la longitud (L) de una columna de arena y la presión del agua en las partes superior (h1) e inferior (h2) de la misma.

La expresión original de Darcy,

$$q = \frac{k * s * (h + e - h_0)}{e}$$

Pueden presentarse en términos actuales con la expresión:

$$Q = \frac{kA(h_1 - h_2)}{L}$$

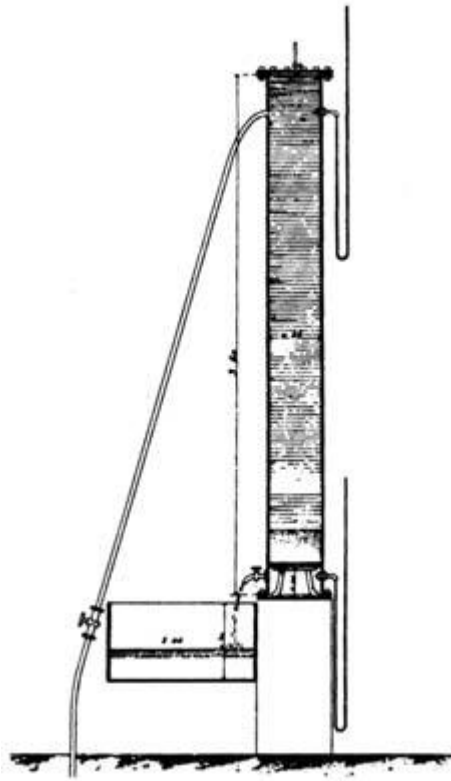


Figura 05: Equipo usado por Henry Darcy en sus experimentos. (Darcy, 1857)

Donde: Q: Caudal

k: Coeficiente de permeabilidad

h1: altura, sobre el plano de referencia, entrada de la capa filtrante

h2: altura, sobre el plano de referencia, salida de la capa filtrante

L: Longitud del espécimen.

A partir de la propuesta original de Darcy, la determinación de la conductividad hidráulica se hace con permeámetros de carga constante y variable (ASTM, 2006a, 2006b) en el laboratorio y mediante pruebas de campo (ASTM, 2000c, Spangler & Handy, 1980).

Estas mediciones se limitan implícitamente a las condiciones en que ocurre un flujo gravitacional (ASTM, 2006b). La determinación de la conductividad

hidráulica cuando ésta es baja o muy baja, por debajo de un valor de 10^{-3} cm/s exige técnicas diferentes y aparatos más sofisticados, que induzcan y fuercen el flujo del agua contra las fuerzas de adsorción en las partículas minerales de la arcilla (Conca y Wright, 1998, Feuerharmel et al, 2007), sea mediante la aplicación de energía mecánica (ensayo de consolidación) o eléctrica (electrocinesis).

Romaña J (2014) menciona que los procedimientos para la determinación de la conductividad hidráulica de los suelos se pueden dividir básicamente en dos grupos: los “directos”, porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición del coeficiente de conductividad hidráulica, y los “indirectos”, ya que proporcionan el valor del coeficiente de conductividad hidráulica en forma secundaria, es decir, por medio de pruebas y técnicas diseñadas para otros fines.

Directos:

- Permeámetro de carga constante.
- Permeámetro de carga variable.
- Prueba directa en los suelos in situ.

Indirectos:

- Cálculo a partir de la curva granulométrica.
- Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
- Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

Los métodos para determinar la conductividad hidráulica en campo y laboratorio están normalizados y estandarizados por la ASTM. (ver tabla 2.)

Tabla 2: Métodos estandarizados por ASTM para pruebas de permeabilidad en suelos.

Clave	Nombre de la prueba
D2434	Permeabilidad de suelos granulares mediante la prueba de carga constante.
D3385	Tasa de infiltración de suelos (en campos) utilizando la prueba del infiltrómetro de doble anillo.
D4043	Selección del método de prueba en acuífero para la determinar de propiedades hidráulicas.
D4044	(Procedimiento de campo) Prueba de cabeza variable para determinar propiedades hidráulicas de los acuíferos
D4050	(procedimiento de campo) Pruebas de Retiro y pozo de inyección para determinar propiedades hidráulicas de los sistemas acuíferos
D4511	Conductividad hidráulica de turbas saturadas mediante la prueba de carga constante
D5126	Comparación de métodos de campo para determinar la conductividad hidráulica en la zona húmeda
D5084	Conductividad hidráulica de materiales porosos saturados utilizando la prueba del permeámetro de pared flexible.

1.2.4.2 Circulación de fluidos a través de lechos porosos y tortas

1.2.4.2.1 Velocidad media superficial y velocidad media real de un fluido

Un concepto que se va repetir en muchas ocasiones cuando se analiza la circulación de fluidos a través de sólidos, independientemente de si éstos están fijos o en movimiento, es la relación que existe entre la velocidad media a la que circula el fluido entre los sólidos y la velocidad media calculada como caudal de circulación dividido por la sección total del conducto donde tiene lugar el proceso. Considérese en primer lugar un lecho fijo de partículas sólidas macizas, por el que circula un fluido, tal como se muestra en la Figura 4.

$$u = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

Figura 4. Lecho fijo de sólidos por el que circula un fluido

La velocidad superficial, u_+ , con que circula el fluido, se calcula como caudal Q (m³/s) dividido por la sección S del cuerpo geométrico ($\pi D^2/4$), siendo D el diámetro del tubo cilíndrico. Ahora bien, la velocidad media, u , con que circula el fluido a través de los huecos será mayor y se puede calcular de la siguiente

forma: supóngase que durante un periodo de tiempo Δt , ha circulado un volumen $Q\Delta t$. Este volumen ocupará una distancia ΔL en el lecho, por lo que

$$u = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{S\Delta L}{S\Delta t} = \frac{\text{volumen total cilindro}}{S\Delta t} = \frac{\frac{\text{volumen total del fluido}}{\varepsilon}}{S\Delta t} = \frac{\frac{Q\Delta t}{\varepsilon}}{S\Delta t} = \frac{u^+}{\varepsilon}$$

Por otra parte, la sección libre de paso o de los huecos S_{paso} , se puede relacionar con la sección S mediante la siguiente expresión:

$$\text{volumen fluido} = S_{\text{paso}} \Delta L = (\text{volumen cilindro}) \varepsilon = S \varepsilon \Delta L$$

De donde:

$$S^+ = S \varepsilon = S(1 - \varepsilon_s)$$

Es importante no olvidar que el concepto de velocidad de fluido a través de los huecos se refiere siempre al valor medio, ya que hay un gradiente de cantidad de movimiento (velocidad máxima en los centros de los huecos, y velocidad nula en las capas adheridas a los sólidos).

Es en estas condiciones, cuando se ha definido el concepto de velocidad superficial del fluido, se puede definir un módulo de Reynolds de partícula, Re_p , de forma que:

$$Re_p = \frac{\rho u^+ d_p}{\mu}$$

donde ρ y μ son la densidad y viscosidad del fluido, u^+ la velocidad superficial definida anteriormente y d_p el tamaño medio de las partículas.

1.2.4.2.2 Definición de lecho fluidizado

Cuando una corriente lo suficientemente fuerte se hace pasar a través de un lecho empacado y logra levitar a las partículas por efecto de las fuerzas de rozamiento se dice que el lecho se encuentra fluidizado. Un lecho fluidizado se caracteriza por un elevado grado de mezcla, comportándose el lecho de partículas sólidas como si fuera un fluido, (Rodríguez, *et al* 2002).

1.2.5 Característica de las partículas

1.2.5.1 Porosidad del lecho (ϵ)

Esta característica del lecho o cama depende de la relación existente entre el diámetro de la partícula, el diámetro del lecho, la rugosidad de las paredes de la columna, la presión y la temperatura de operación (Guaneros, 2005).

Para medir el porcentaje de poros en el lecho, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{\text{volumen del lecho} - \text{volumen de las partículas}}{\text{volumen del lecho}}$$

1.2.5.2 Esfericidad (Φ)

Esta característica propia de la partícula pues mayormente tiene formas irregulares por lo que urge un método para obtener un grado de esfericidad con el mismo volumen que el volumen de la partícula.

$$\phi = \frac{\text{Área superficial de una esfera con el mismo volumen que el de la partícula}}{\text{Área superficial de la partícula}}$$

El volumen de la partícula se determinara por la siguiente ecuación:

$$V_p = \frac{\pi d_p^3}{4}$$

Donde :

V_p = volumen de la partícula (m^3)

π = (-)

d_p = diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen de la partícula (m)

1.2.5.3 Diámetro de la partícula

Esta determinado por el diámetro, se medirán los diámetros correspondientes al grosor, ancho y largo, determinando de esta manera el diámetro promedio para cada partícula.

1.2.5.4 Densidad de la partícula (ρ_p)

La densidad de la partícula se puede determinar de la siguiente manera:

$$\rho_p = \frac{\text{masa de la partícula}}{\text{volumen de la partícula}}$$

Que relaciona la masa de la partícula con el volumen ocupado considerando también la porosidad del mismo.

Para las partículas compactas, $\rho_p = \rho_{\text{abs}}$ (densidad absoluta) y para las partículas porosas, $\rho_p < \rho_{\text{abs}}$

1.2.5.5 Área superficial (a)

Es el área en contacto entre el gas y el sólido. La siguiente ecuación muestra la obtención del área superficial cuando una partícula no es esférica:

$$a = \frac{\pi d^2}{4}$$

Donde:

d = diámetro de la partícula

1.2.5.6 Clasificación de las partículas

Geldart, (1973), agrupo en cuatro grupos a las partículas considerando tamaño y densidad.

Grupo A: El tamaño de la partícula es pequeño y una densidad baja ($\rho_p < 1.400 \text{ kg/m}^3$). El lecho se expande antes de que ocurra el burbujeo ($U_{\text{mb}}/U_{\text{mf}} > 1$).

Grupo B: El tamaño de las partículas y las densidades considerados como medianos. El burbujeo empieza a una naciente fluidización ($U_{\text{mb}}/U_{\text{mf}} = 1$). La mayoría de las burbujas ascienden más rápidamente que el gas intersticial. El tamaño de burbuja es independiente al tamaño de la partícula.

Grupo C: Las partículas son cohesivas, es decir difíciles de fluidizar.

Grupo D: Partículas largas y densas. Las partículas requieren de una velocidad de gas, mayores a las otras categorías para poder fluidizar el lecho.

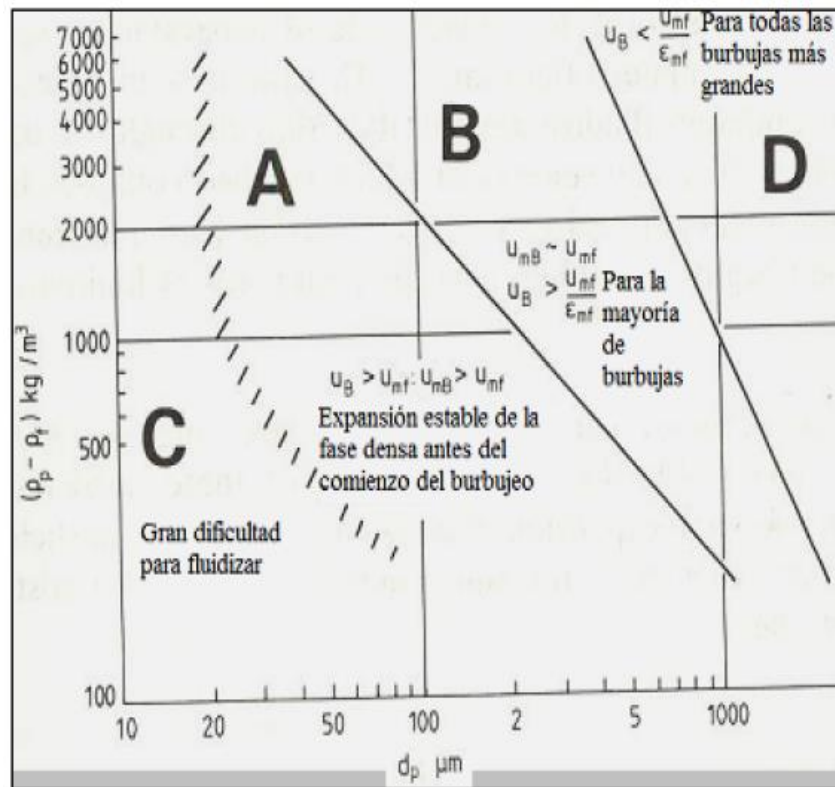


Figura 06: Clasificación de las partículas de Geldart (Geldart, 1973)

1.2.6.5 Velocidades relacionadas en un lecho fluidizado

En un lecho fluidizado se relacionan cuatro diferentes tipos de velocidades que se presentan en diferentes fases o tipos de lecho que son: velocidad superficial del gas (U_0), velocidad mínima de fluidización (U_{mf}), velocidad terminal (U_t), y la velocidad mínima de burbujeo (U_{mb}).

1.2.6.1 Velocidad superficial del gas (U_0)

Se puede entender como la velocidad en función del área transversal del lecho, se determina cuando en el interior no existen partículas y solo fluye el gas (aire). Se obtiene con la siguiente fórmula:

$$U_0 = \frac{m}{\rho_g \varepsilon_m A_t}$$

Donde:

U_0 = Velocidad superficial del gas (m/s).

ε_m = Porosidad del lecho (-)

ρ_g = Densidad del gas (kg/m³)

m = masa (kg)

A_t = Área transversal de la columna (m^2)

Al no conocer la fracción vacía, se aplica la siguiente formula por Romero (2006).

$$U_0 = \frac{V}{A_t}$$

Donde:

U_0 = Velocidad superficial del gas (m/s)

V = Flujo volumétrico del gas (m^3/s)

A_t = Área transversal (m^2)

1.2.6.2 Velocidad mínima de fluidización

Es la velocidad mínima que debe de tener el aire ascendente al momento de entrar en contacto con el lecho de partículas logrando un ligero levantamiento de las mismas, la U_{mf} corresponde a una situación homogénea donde no se toman en cuenta las burbujas.

Para encontrar la velocidad mínima de fluidización del gas, se utiliza una extrapolación de la ecuación de Ergun (Ergun, 1952) para lechos fijos combinada con la ecuación de caída de presión que se muestra a continuación. Ambas relacionan las variables que definen, y la combinación de estas cubre todos los factores que ayudan a encontrar toda la velocidad mínima de fluidización teórica.

Ecuación de la caída de presión.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{g}{g_c} \left(1 - \varepsilon_{mf} \right) \left(\rho_s - \rho_g \right)$$

Donde:

ΔP = caída de presión (kPa)

L = altura del lecho (m)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

g_c = constante adimensional

ε_{mf} = porosidad mínima de fluidización

ρ_s = densidad del solido (kg/ m³)

ρ_g = densidad del fluido (kg/ m³)

Combinando las dos ecuaciones:

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$$

Donde:

Φ_s = esfericidad de la partícula (-)

d_p diámetro de la partícula (cm)

ε_{mf} = porosidad mínima de fluidización (-)

μ = viscosidad del gas (kg/ ms)

U_{mf} = velocidad mínima de fluidización (m/s)

ρ_s = densidad del solido (kg/ m³)

ρ_g = densidad del fluido (kg/ m³)

Se debe de considerar que la velocidad mínima de fluidización experimental se puede encontrar mediante el análisis de las gráficas versus la caída de presión, velocidad versus altura del lecho y velocidad versus porosidad del lecho. El análisis consiste en ver la tendencia de la curva, donde hay un cambio ahí es donde se ubica la velocidad mínima de fluidización. Para considerar que la U_{mf} es la correcta las curvas generadas deben de estar cercanas entre sí.

CAPÍTULO II: CONCLUSIONES

1. La ventaja que ofrece la circulación de fluido por lecho poroso es el fácil manejo bajo operaciones y condiciones controladas del fluido de aire de caliente con particular.
2. En relación a los cambios físicos organolépticos de sufren las partículas sólidas al flujo de fluidos de la operación, brindan confiabilidad en función al producto terminado, siendo idóneos desde el punto de vista tecnológico, por motivo que se preservan gran parte de sus componentes nutricionales según los antecedentes.
3. La aplicación de la operación de circulación de fluido por lecho poroso, en función a los procesos tecnológicos – alimentarios y seguridad industrial son confiables proporciona una alta seguridad en la relación de peligros y riesgos identificables, dentro de marco normativo de la Ley 29783. Ley de seguridad y salud en el trabajo.

CAPÍTULO III: RECOMENDACIONES

1. Ejecutar el proyecto de investigación experimental adecuado diseño de Circulación de fluido por lecho poroso de frutas y legumbres de la región.
2. Realizar la investigación comparativa de circulación de fluido por lecho poroso versus de los más métodos para determinar las perdidas en función a características nutricionales.

CAPÍTULO IV: FUENTES DE INFORMACIÓN

ASTM, 2006a, Standard Test Method ASTM D2434-68(2006) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), Book of Standards Volume: 04.08.

ASTM, 2006b, Standard Test Method ASTM D5084 - 03 Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, Book of Standards Volume: 04.08.

ASTM, 2006c, ASTM D5126-90(2004) Standard Guide for Comparison of Field Methods for Determining Hydraulic Conductivity in the Vadose Zone, Book of Standards Volume: 04.08.

Brennen, C.E., 2005, Fundamentals of Multiphase Flow, Cambridge U. Press, 410 p.

Carrera M y Pacheco J, 2012. Estudio Experimental de Permeabilidad en Medios Porosos Gruesos. Escuela Politécnica del Ejercito. Carrera Ingeniería Civil. Sangolqui – Ecuador.

Cengel Y. Mecánica de fluidos. Primera edición, New York, McGrawhil, I (2006)

CONCA, J. L. & J. V. WRIGHT (1998) The UFA Method for Rapid, Direct Measurements of Unsaturated Soil Transport Properties, Australian J. of Soil Research, vol. 36, p. 291-315.

Ergun S. "Fluid flow throu paked columns" Chem. Eng. Prog. 48, 89, 1952.

FEUERHARMEL, C., PEREIRA, A., BICA, A.V. D., GEHLING, W. Y. Y. & VIVIAN, J. B., 2007, Desenvolvimento de um permeâmetro de parede flexível para determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados, VI Simpósio brasileiro de solos não saturados 2007, 457-466, Salvador-Bahia

Fredlund, D.G., 2000, The Implementation of Unsaturated Soil Mechanics into Geotechnical Engineering Practice, Canadian Journal of Geotechnics. Traducción al castellano de F. Hoyos Patiño, 2000, Implementación de la Mecánica del Suelo Parcialmente Saturado, Hombre Nuevo Editores.

Geldart, D. Powder Technol., pp. 7,285, 1973.

González G 2017. Simulación de flujos lentos a través de medios porosos fractales determinísticos. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Mexico D.F 2017.

Guarneros, G 2005. Mejoras en la operación de un sistema de secado en lecho fluidizado al vacío con vapor sobrecalentado. Experimentación con pimienta en grano. Tesis. Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México.

Hoyos Patiño, F. 2005, Darcy sesquicentenario, II Simposio de Erosao dos Solos Tropicais, Zona Centro Oeste, Memorias, Goiania.

Hoyos Patiño, F., 2006, Permeabilidad y Flujo subterráneo, [Notas de clase], Disponible: <http://www.fabianhoyos.com/pdfs/cursos/Permeabilidad.pdf>. [Citado el 25 de junio de 2008].

Hoyos Patiño, f., Valencia González Y., 2010, Ley de Darcy acotada, XIII Congreso Colombiano de Geotecnia, Manizales.2010, Memorias, edición digital, Manizales.

LAMBE, T., & WHITMAN, R. (2004). *Mecánica de Suelos*. México: LIMUSA.

Louis, c., 1969. "A Study of Groundwater Flow in Jointed Rock and Its Influence on the Stability of Rock Masses," Rock Mechanics Research Report No. 10, 1969, Imperial College, London, England. Available from: Technical

Information Center, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station,
P. O. Box 631, Vicksburg, MS 39180-0631.

Ramírez R, Carmona A y Pérez G. 2006. Cambios en la conductividad hidráulica y su relación con otras variables físicas de un andisol bajo diferentes sistemas de manejo, en el municipio de Marinilla (Antioquia).

Romaña J 2014. Los límites de la ley de Darcy. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil. Medellín – Colombia.

Santayana T, 1981. Estudio del comportamiento hidrodinámico del filtro protector laminar LM en el flujo radial hacia pozos de agua. Universidad Nacional Agraria La Molina. Programa Académico de Ingeniería Agrícola. Lima – Perú.

Scheidegger, A.E, 1960. The Physics of Flow Through Porous Media.

TERZAGHI, K. & PECK, R.B., 1946, Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, New York.

Vargas E, 2011. Estudio del flujo de agua para generar reportes de práctica en el tablero de fluidos del laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Ambato – Ecuador.