

# Representación de estados y trayectorias volumétricas y gravimétricas en suelos

## Volumetric and gravimetric representation of paths in soils

Oscar Correa-Calle. Ph.D (c).<sup>1\*</sup>; Francisco Javier García Orozco Ph.D.<sup>2\*</sup>; Diego Alexander Escobar García. Ph.D.<sup>3\*</sup>.

<sup>1</sup>Docente investigador Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Manizales - Colombia. \*oscorrea@unal.edu.co

<sup>2</sup>Docente investigador Director Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Manizales - Colombia. \*fjgarciaor@unal.edu.co

<sup>3</sup>Docente investigador Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Manizales - Colombia. \*daescobarga@unal.edu.co

Fecha de recepción del artículo: 20/02/2013 Fecha de aceptación del artículo: 31/05/2013

### Resumen

En este artículo se parte de los conceptos básicos sobre relaciones volumétricas y gravimétricas de un suelo, considerado este como un sistema de partículas compuesto por tres fases (sólida, líquida y gaseosa). Se construyó un diagrama que permitió representar de manera sintética y simultánea, los principales cambios físicos que sufre el suelo. Cambios en términos de peso específico húmedo, humedad, relación de vacíos y saturación, durante la ocurrencia de procesos como humedecimiento y secado, saturación y desaturación, compresión y extensión, contracción y expansión, consolidación, flujo estacional y flujo transitorio. Cada proceso físico siguió una trayectoria diferente, a partir de un estado volumétrico y gravimétrico inicial.

### Palabras clave

Mecánica de suelos, Procesos de carga-descarga, relaciones de fases.

### Abstract

This article builds on the basic concepts of volumetric and gravimetric soil relationships, conside-

red this as a particle system consists of three phases (solid, liquid and gas). We propose a diagram to represent synthetically and simultaneous, major physical changes experienced by the soil. Changes in terms of specific wet weight, moisture, void ratio and saturation, during the occurrence of processes as: wetting and drying, saturation and desaturation, squash and stretch, contraction and expansion, consolidation, seasonal flow and transient flow. Each physical process follows a different path from an initial volumetric and gravimetric state.

### Keywords

Soil mechanics, Charge-discharge processes, phase relations.

### 1. Introducción

En la naturaleza, los suelos son sistemas de tres fases que consisten de partículas sólidas de suelo, agua y aire [1]. Las relaciones volumétricas y gravimétricas entre fases del suelo se derivan en forma analítica a partir de las proporciones relativas de los volúmenes y pesos correspondientes a dichas fases, razón por la cual, también se les conoce como relaciones de

fase del suelo. El cálculo de las diferentes relaciones de fases para valores concretos de peso y volumen, arroja magnitudes que representan un estado instantáneo pero transitorio del suelo. Dado un estado volumétrico y gravimétrico inicial, es posible representar gráficamente los cambios continuos de las relaciones entre fases, debidos a diversos procesos físicos que pueden ocurrir en un suelo. El presente trabajo ilustra el desarrollo de un diagrama que permite representar tales trayectorias volumétricas y gravimétricas, de manera didáctica y sencilla, lo cual lo hace atractivo para facilitar el aprendizaje de la mecánica de suelos y para favorecer la comprensión más precisa del comportamiento de los suelos.

## 2. Metodología

Para entender mejor los suelos, sus propiedades y alguna de las relaciones que se presentan entre la amplia gama de variables que tipifican las condiciones de un suelo, se elaboró un análisis en el que se pretendió llegar a partir de las relaciones volumétricas y gravimétricas entre fases del suelo, al desarrollo de un diagrama que permite representar tales trayectorias volumétricas y gravimétricas, de manera didáctica y sencilla. Esto lo hace atractivo para facilitar el aprendizaje de la mecánica de suelos y favorece la comprensión más precisa del comportamiento de los suelos.

### 2.1. Diagrama de fases

Para desarrollar las relaciones peso-volumen de un suelo, las tres fases [1] pueden ser separadas como se muestra en la Figura 1. Allí se definen las variables de pesos y volúmenes de las tres fases componentes.

### 2.2. Principales relaciones de fases [1]

#### 2.2.1. En volumen

Relación de vacíos:  $e = \frac{V_v}{V_s}$

Porosidad:  $n = \frac{V_v}{V}$       Saturación:  $S = \frac{V_w}{V_v}$

#### 2.2.2. En peso

Contenido de humedad:  $\omega = \frac{W_w}{W_s}$

Peso específico del suelo húmedo:  $\gamma = \frac{W}{V}$

Peso específico del agua:  $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$

Peso específico de sólidos:  $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$

Peso específico seco:  $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$

Peso específico saturado:  $\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V}$

Peso específico sumergido:  $\gamma_b = \gamma_{sat} - \gamma_w$

Peso específico del agua a 4°C:  $\gamma_0 = 9.81 \text{ kN} / \text{m}^3$

Gravedad específica del agua:

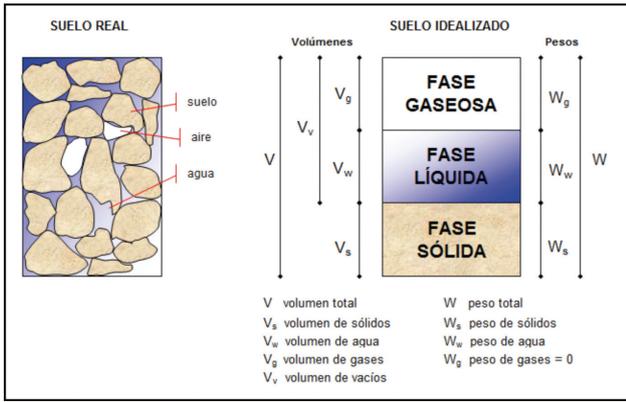
(o peso específico relativo del agua)  $G_w = \frac{\gamma_w}{\gamma_0}$

Gravedad específica de sólidos:

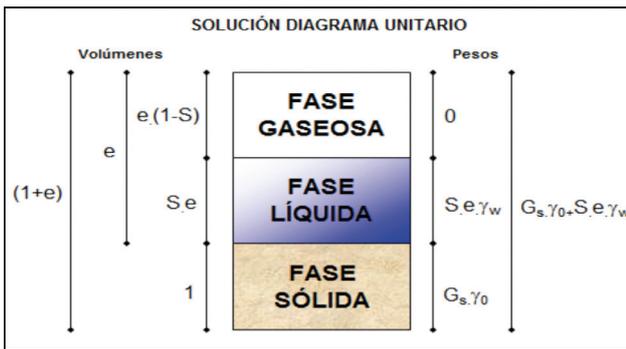
(o peso específico relativo de sólidos)  $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0}$

### 2.3. Solución de un diagrama de fases unitario

Suponiendo que se conocen los valores de  $G_s$ ,  $e$  y  $S$ , aceptando que  $\gamma_w \approx \gamma_0$ , y asumiendo un valor unitario



**Figura 1:** Idealización de las fases del suelo y definición de variables.



**Figura 2:** Solución al diagrama de fases unitario.

rio para el volumen de sólidos,  $V_s=1$ , es posible resolver el diagrama unitario de la Figura 1, mediante el empleo de las definiciones de las relaciones de fases, de la siguiente manera:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \rightarrow V_v = e \text{ y } V = 1 + e;$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} \rightarrow V_w = S \cdot e \text{ y } V_g = e(1 - S); \gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$$

$$\rightarrow W_w = S \cdot e \cdot \gamma_w; G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} = \frac{W_s}{V_s \gamma_0} \rightarrow W_s = G_s \gamma_0 \text{ y}$$

$$W = G_s \gamma_0 + S e \gamma_w$$

La solución al diagrama unitario se representa mediante la Figura 2. Una relación muy útil para la resolución de muchos problemas de relaciones de fases, se obtiene a partir de aplicar el concepto de contenido de humedad, con las magnitudes obtenidas en el diagrama de fases de la Figura 2:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{S e \gamma_w}{G_s \gamma_0} \rightarrow G_s \gamma_0 \omega = S e \gamma_w$$

Asumiendo que:  $\gamma_w \approx \gamma_0 \rightarrow \boxed{G_s \omega = S e}$

La simplificación práctica de igualar el peso específico del agua a la temperatura del laboratorio  $\gamma_w$ , al peso específico del agua destilada al nivel del mar a 4 °C, es decir,  $\gamma_w \approx \gamma_0$ , no conduce a diferencias significativas en los resultados [2, 3].

## 2.4. Diagrama para representar trayectorias volumétricas y gravimétricas

Seguidamente, se desarrolló un diagrama que relaciona el peso específico húmedo ( $\gamma$ ) en las ordenadas, y la humedad ( $\omega$ ) en las abscisas, mediante curvas de igual saturación (curvas de iso-saturación) y rectas de igual relación de vacíos (líneas de iso-vacíos). Sin embargo, al final se normalizaron las ordenadas al peso específico del agua, con el fin de hacer un diagrama general que es independiente de las unidades empleadas [4]. Aplicando la definición de peso específico húmedo a las magnitudes descritas en el diagrama unitario de la Figura 2, se tiene:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{G_s \gamma_0 + S e \gamma_w}{1 + e} \quad (1)$$

En la solución al diagrama unitario de fases se obtuvo que:

$$G_s \omega = S e \quad (2)$$

Remplazando (2) en (1) y despejando convenientemente, se llega a:

$$\gamma = \left( \frac{G_s \gamma_0}{1+e} \right) + \left( \frac{G_s \gamma_0}{1+e} \right) \omega \quad (3)$$

Expresión que describe la variación del peso específico húmedo del suelo, con los cambios de humedad.

#### 2.4.1. Curvas de igual relación de vacíos (iso-vacíos)

Considerando valores constantes de la relación de vacíos  $e$  y de la gravedad específica  $G_s$ , los términos entre paréntesis en la expresión (3), serán también constantes. Por tanto, ésta expresión representa una familia de líneas rectas con la humedad  $\omega$ , como variable independiente; y el peso específico del suelo húmedo, como variable dependiente. En este caso, el término  $G_s \gamma_0 / (1+e)$  corresponde al intercepto en el eje de las ordenadas (peso específico para un contenido de humedad  $\omega=0\%$  o peso específico seco del suelo  $\gamma_d$ ), y el término  $G_s \gamma_0 / (1+e)$  corresponde a la pendiente (véase la Figura 3). La construcción de cada línea de isovacíos, se lleva a cabo evaluando la expresión (3) con diferentes valores de humedad, para una relación de vacíos constante, y luego dibujando la línea recta correspondiente. Repitiendo el procedimiento para varios valores de la relación de vacíos, seleccionados dentro de un rango factible de variación de este parámetro, se obtiene una parte del diagrama; como se muestra en la Figura 3. En la práctica, no suelen hallarse valores menores de 0.25 en arenas muy compactas con finos, ni mayores de 15 en el caso de algunas arcillas altamente compresibles [2].

#### 2.4.2. Curvas de igual saturación (iso-saturación)

Las curvas de igual saturación, corresponden a una familia de curvas con grado de saturación y gravedad específica  $G_s$  constantes. Estas se obtienen a partir de la transformación de la ecuación (3), en función del grado de saturación. Para ello, se despeja la relación de vacíos de la ecuación (2), y se

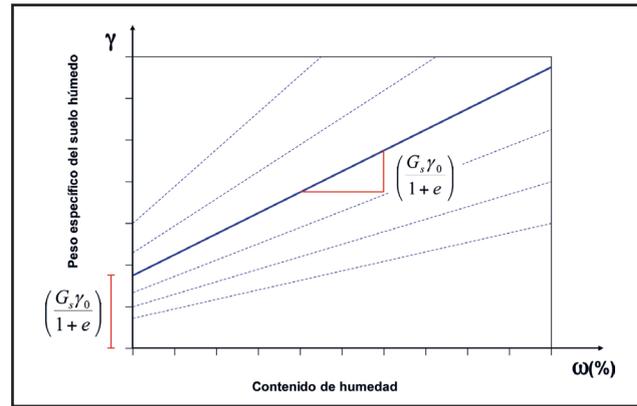


Figura 3. Familia de líneas que representa lugares geométricos de todos los puntos con igual relación de vacíos.

reemplaza en la ecuación (3). Ordenando convenientemente, se obtiene:

$$e = \frac{G_s \gamma_0}{S} \quad (4)$$

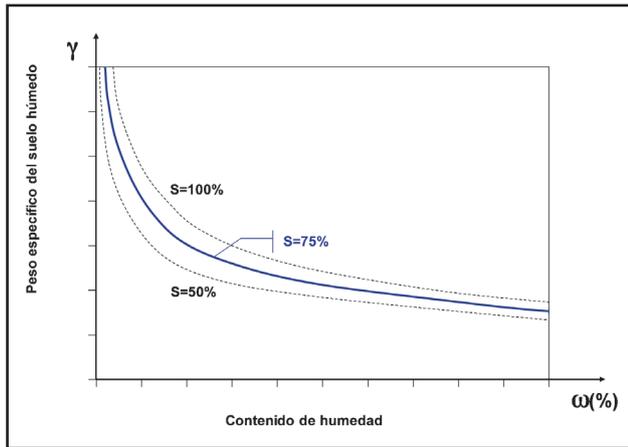
Reemplazando (4) en (3) y ordenando, se llega a:

$$\gamma = \frac{G_s \gamma_0 S (1 + \omega)}{S + G_s \omega} \quad (5)$$

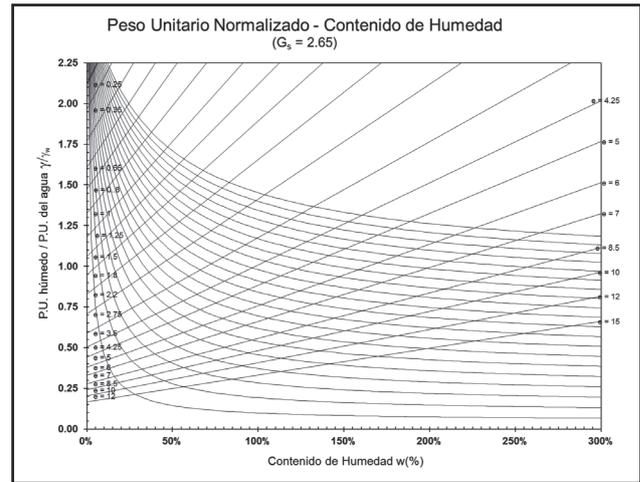
Las curvas de iso-saturación se construyen mediante la evaluación de la expresión (5) para varios valores de humedad, manteniendo el grado de saturación  $S$  constante, y luego dibujando la curva correspondiente. Al repetir este procedimiento para varios valores de  $S$  entre 0% y 100%, se obtiene la otra parte del diagrama mostrada en la Figura 4. Combinando los resultados de las Figuras 3 y 4, se obtiene el diagrama propuesto mostrado más adelante en la Figura 5.

### 3. Resultados y análisis

Con la combinación de los elementos anteriores, se pudieron obtener las trayectorias volumétricas y



**Figura 4.** Familia de líneas que representa lugares geométricos de todos los puntos con igual grado de saturación.



**Figura 5.** Diagrama para representar el estado y las trayectorias volumétricas y gravimétricas del suelo.

gravimétricas, volumétricas y gravimétricas idealizadas, compresión-saturación – consolidación, extensión – desaturación, entre otras. A continuación se presentan estos resultados.

### 3.1. Diagrama para representar trayectorias volumétricas y gravimétricas

En la Figura 5, se presenta un ejemplo de diagrama construido para una gravedad específica  $G_s = 2.65$ , considerando un rango de variación de la relación de vacíos  $e = \{0.25, 15\}$ , un rango de variación del grado de saturación  $S = \{0, 100\} \%$  y un rango de variación de humedades  $\omega = \{0, 300\} \%$  en %, de acuerdo con los procedimientos descritos. Por conveniencia, se procede a normalizar el peso específico húmedo del suelo con respecto al peso específico del agua ( $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$ ), obteniendo así un valor adimensional. Nótese que el grado de saturación crece desde la línea inferior hacia arriba, mientras que la relación de vacíos crece desde la línea superior hacia abajo (sentido horario). La línea de iso-saturación para  $S=100\%$ , representa los suelos que se encuentran en una condición bifásica (sólidos y líquidos). Esta constituye el límite superior del diagrama. La región del diagrama que se encuentra por encima de ella, corresponde

a estados volumétricos y gravimétricos físicamente imposibles.

### 3.2. Trayectorias volumétricas y gravimétricas idealizadas

En la Figura 6, se representan las trayectorias volumétricas y gravimétricas simplificadas para varios procesos físicos que pueden ocurrir en un determinado suelo, como humedecimiento y secado; saturación y des-saturación; compresión y extensión; contracción y expansión; consolidación; flujo estacional y flujo transitorio, a partir de un estado volumétrico y gravimétrico inicial, representado por el punto “o” (valores de  $\gamma$ ,  $\omega$ ,  $e$ ,  $S$ ,  $G_s$  dados). Por lo pronto, el diagrama no está asociado a estados límite de falla, razón por la cual, solo se consideran aquí los cambios isotrópicos en el estado de esfuerzos, pero no la aplicación de esfuerzos desviadores hasta la rotura.

#### 3.2.1. Trayectoria: Compresión – Saturación – Consolidación

La compresión de un suelo es causada por un incremento gradual de carga como la construcción de un edificio. Si el suelo tiene saturación parcial y no ocurre succión significativa en su interior durante

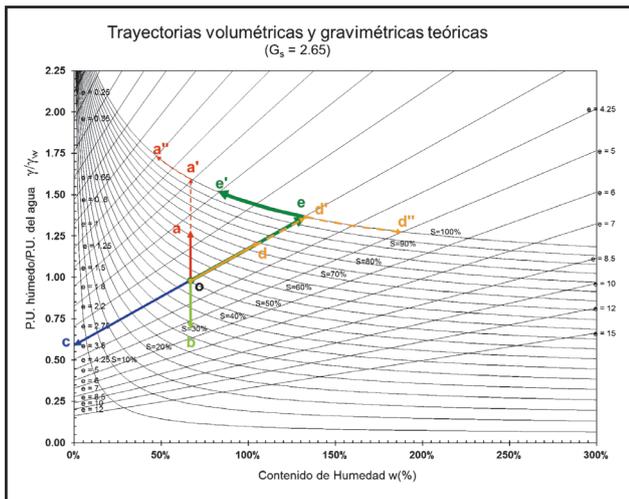


Figura 6. Trayectorias volumétricas y gravimétricas en varios procesos físicos que ocurren en el suelo.

el proceso, como es el caso de los suelos granulares gruesos, el proceso ocurrirá sin salida de agua hasta alcanzar la saturación, y por tanto, la trayectoria volumétrica y gravimétrica será vertical en el diagrama propuesto. En ese caso, a partir de un punto “o” que representa el estado volumétrico y gravimétrico inicial de un suelo parcialmente saturado (con  $\gamma_0$ ,  $\omega_0$ ,  $e_0$ ,  $S_0$ ,  $G_s = \text{constante}$ ), el proceso de compresión sin salida de agua se representa mediante la trayectoria vertical hacia arriba o-a de la Figura 6, en la cual existe un incremento gradual del peso específico húmedo del suelo, sin cambio apreciable del contenido de humedad. De acuerdo con las líneas de iso-vacíos y de iso-saturación del diagrama, el suelo al ser comprimido, va alcanzando la saturación por reducción del volumen de vacíos y salida de aire (reducción de la relación de vacíos  $e$ ).

Si se continúa el proceso de compresión, el suelo podrá alcanzar una saturación  $S=100\%$  (trayectoria o-a’). A partir de ese momento, la compresión continuará causando la reducción del volumen de vacíos, pero con salida de agua en lugar de salida de aire, siguiendo la curva de saturación completa (trayectoria a’-a’”). Por tanto, a partir del punto a’, comienza realmente el proceso de consolidación del suelo; que como se sabe, es un proceso de carga

dependiente del tiempo, en función de la conductividad hidráulica saturada correspondiente a cada incremento de esfuerzo efectivo

Teóricamente, el peso específico húmedo que se puede alcanzar en este proceso, será infinito, si la carga se incrementa también en forma infinita. En la práctica, existen límites físicos correspondientes a las magnitudes de carga de las obras de ingeniería. Se puede notar que ninguna trayectoria podrá superar la línea de iso-saturación  $S=100\%$ , puesto que la región del diagrama que se encuentra por encima de ella corresponde a estados volumétricos y gravimétricos físicamente imposibles. Es decir, dicha curva es el límite superior del mismo. Sin embargo, en presencia de suelos con finos arcillosos (común en suelos tropicales como consecuencia de la meteorización química), podrá comenzar a salir agua antes de la saturación, por acción de burbujas de aire a presión contenidas en el agua, las cuales tienden a salir durante el proceso de compresión. En ese caso, la trayectoria idealizada sería una curva entre a y a’”.

#### 4. Conclusiones

El diagrama de Espacio de Fases que se propone en el presente artículo, es fundamentalmente una herramienta didáctica para la enseñanza de las relaciones entre las fases de los suelos, considerando que se pueden ver simultáneamente las magnitudes instantáneas del peso específico total del suelo húmedo, de la humedad, del grado de saturación, de la relación de vacíos y del peso específico seco correspondiente, para un suelo de  $G_s$  dado.

Fue desarrollado como una herramienta académica para diseñar fácilmente problemas de mecánica de suelos, respetando los rangos físicamente factibles de las relaciones de fases, considerando los errores encontrados en algunos textos disponibles para el proceso de enseñanza – aprendizaje.

Además, permite representar los cambios continuos en las magnitudes de las relaciones de fases de

un suelo, causadas por diversos fenómenos físicos posibles, mediante trayectorias volumétricas y gravimétricas.

Por otra parte, constituye una herramienta ilustrativa del lugar geométrico de todos los puntos que representan estados de fases físicamente posibles.

Adicionalmente, permite diferenciar tipos de suelos en términos de sus espacios de fases, y por tanto, de su comportamiento volumétrico y gravimétrico factible.

Finalmente, se presenta un ejemplo del potencial que tiene este diagrama para caracterizar materiales heterogéneos, para controlar su proceso de compactación y para determinar los momentos más adecuados para llevarlo a cabo con éxito, en función del contenido de humedad que el material presente.

## Referencias

1. Braja M., Das (2011). "Principles of Foundation Engineering". Cengage Learning, SI Seventh Edition. Stanford (United States).
2. Juárez B., Eulalio y Rico R., Alfonso (1980). "Mecánica de Suelos". Editorial Limusa S.A., México D.F (México).
3. Lambe, T. William y Whitman, Robert V. (1991). "Mecánica de Suelos". Editorial Limusa S.A., México D.F (México).
4. Correa-Calle, Oscar (2005). "Modelo dinámico para calificación de la amenaza pluvial y evaluación de la posibilidad de erosión en la sectorización geotécnica de oleoductos y su aplicación a la planeación y toma de decisiones". Universidad Nacional de Colombia,