

# PROPAGACIÓN DEL INCREMENTO DE ESFUERZOS VERTICALES EN UN SUELO AGRÍCOLA DE TARABUCO: EFECTO DE LA SUCCIÓN MATRICIAL Y ANÁLISIS COMPARATIVO

Torrico, J.A.<sup>1</sup>, Di Emidio, G.<sup>2</sup>, Cornellis, W. <sup>3</sup>, Rojas, J.C. <sup>4</sup>, Bezuijen, A. <sup>5</sup>

- 1 Responsable Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), doctorando en Ingeniería Civil Universidad de Gante-Bélgica, Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Planta baja, Sucre, Bolivia. E-mail: JuanAlfredo.TorricoBravo@UGent.be
- 2 Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de ingeniería civil. E-mail: Gemmina.DiEmidio@ugent.be.
- 3 Profesor de la Universidad de Gante, Departamento de Biociencias, Universidad de Gante. E-mail: Wim.Cornelis@ugent.be.
- 4 Docente titular de la carrera de ingeniería civil, Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: geotecnia@gmail.com.
- 5 Director del laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Gante, Universidad de Gante. E-mail: Adam.Bezuijen@ugent.be.

Recibido: 03/10/2023

Aceptado: 10/10/2023

Publicado: 10/11/2023

Artículo presentado y expuesto en la 9na Conferencia Internacional en Geotecnia Ambiental (Isla de Creta, Grecia)

## RESUMEN

El presente artículo presenta mediciones en campo de la succión matricial y del incremento de los esfuerzos verticales, los que han sido generados por el paso de un tractor agrícola modelo John Deere 6110D utilizando en sus neumáticos diferentes presiones de inflado: 83 kPa, 110 kPa, 138 kPa y 193 kPa. El sitio de experimentación ha consistido de tres terrenos agrícolas ubicados en la localidad de Tarabuco y todos constituidos en su perfil estratigráfico por un suelo limo arenoso (ML). Para realizar las mediciones del incremento del esfuerzo vertical se han empleado células de carga de compresión (modelo BC-302), en tanto que para realizar la medición de la succión matricial se han empleado tensiómetros de campo (modelo Red Fill). Las mediciones del incremento de esfuerzos verticales, en los tres terrenos y en las tres profundidades predeterminadas de 0.15 m, 0.30 m y 0.45 m, han sido comparadas con soluciones analíticas, a través del software Terranimo y el modelo de Söhne. Con los resultados que se han obtenido se ha concluido que, los resultados de la succión matricial registrados con los tensiómetros a lo largo de los tres terrenos de experimentación con las condiciones de variación de presión de inflado impuestas, no han tenido un efecto significativo en el incremento de los esfuerzos verticales.

Palabras clave: Esfuerzo Vertical, presión de inflado, succión matricial, célula de carga, tensiómetro Red Fill.

## ABSTRACT

The present paper shows the measurements of the increase in vertical stress and matric suction, caused by the passage of agricultural machinery at different conditions of tire inflation pressure. The field test are three agricultural places located in Tarabuco constituted by a sandy silt (ML). The machinery is an agricultural tractor model John Deere 6110D. We employ several tire inflation pressures of 83 kPa, 110 kPa, 138 kPa and 193 kPa for the front and rear wheels, in order to analyse their influence on the distribution of vertical stress beneath the three soil profiles. Increase in vertical stresses and matric suction are studied at the three different depths of 0.15 m, 0.30 m and 0.45 m. For the field measurements of the increase in vertical stress and matric suction, miniaturized compressive load cells (BC302 model) and tensiometers (red fill type) were employed respectively. Finally, measurements of the increase in vertical stress and matric suction were compared between the different tire pressures predetermined. With the results obtained, it was concluded the effect in matric suction variation didn't represent some variation with the correspondent values obtained of the increase in vertical stress.

**Key words:** Vertical stress, tire pressure, Matric suction, Red Fill Tensiometers.

## INTRODUCCIÓN

La succión matricial es la cantidad de energía necesaria para extraer, de un determinado volumen de suelo dado, una determinada cantidad unitaria de agua (Hartge & Horn, 2016); esta succión matricial, en campo, puede ser medida por medio de equipos que consten de piedras porosas y vacuómetros, como por ejemplo los tensiómetros Red Fill (Torrice, 2022, 2021). La succión matricial está directamente relacionada con la resistencia a tracción del suelo, en el sentido que valores de succión altos que se registren en un suelo indican una estructura de suelo resistente (Delgado, 2023). También, la succión, es una función del contenido de humedad del suelo y, por lo tanto, está sujeta a un continuo cambio (Hartge & Horn, 2016) que puede ser monitoreado en campo con el equipo indicado.

La compactación de suelos debido al paso de maquinaria agrícola es el proceso mediante el cual se disminuye su porosidad y se incrementa su densidad. La compactación genera deformaciones que afectan negativamente un suelo agrícola en lo que se refiere a sus funciones vitales, de infiltración, aireación, biodiversidad, crecimiento vegetal. La compactación de suelos

ha sido ampliamente estudiada, pero algunos aspectos aún no están clarificados (Hamza y Anderson, 2005; Chamen et. al., 2015; Keller et. al., 2016). Por otro lado, existen varias incertidumbres asociadas con la medición y simulación de los esfuerzos verticales en el suelo (Keller et. al., 2016), debido a que, en lo que respecta a la adecuada medición en campo de estos esfuerzos, depende en gran magnitud de la correcta instalación de las células de carga en el suelo que se analiza y en lo que respecta a una óptima simulación, por ejemplo, en softwares como PLAXIS 2D, depende de una previa determinación en laboratorio del módulo elástico y el coeficiente de poisson del suelo analizado.

Además, en particular, existe bibliografía más limitada relacionada con la cadena de causa y efecto de un perfil de suelo para alcanzar su estado plástico debido al paso de maquinaria (Lamandé, 2011). Un ejemplo de esta causalidad es la correcta elección de una presión de inflado para los neumáticos trasero y delantero de un tractor agrícola y el efecto que representan en la succión matricial registrada en campo. El objetivo del presente trabajo es analizar el efecto de la succión matricial en el incremento de los esfuerzos verticales debido a la variación

de la presión de inflado de los neumáticos del tractor agrícola (Torrice et. al., 2022). Para cumplir este objetivo se ha realizado la medición de esfuerzos verticales en los tres perfiles de suelos a las profundidades de 0.15 m, 0.30 m y 0.45 m y a diversas presiones de inflado de los neumáticos del tractor agrícola. También se han empleado soluciones analíticas para comparar los resultados de campo (Torrice, 2022).

Finalmente, para evaluar el efecto de la succión matricial en la propagación del incremento de los esfuerzos verticales, se han extraído, de las figuras de monitoreo diario de succión en campo, los valores de la succión en las mismas condiciones de ensayo de los tres diferentes terrenos de ensayo para compararlos entre ellos y posteriormente compararlos entre sus correspondientes valores de incremento de esfuerzo vertical, esto para apreciar si se ha generado alguna variación importante de éste esfuerzo con el cambio de la succión matricial identificada y registrada.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de experimentación y maquinaria

La figura 1 muestra una vista en planta de los tres terrenos de estudio S1, S2 y S3. Para una mayor explicación se pide recurrir al artículo de la anterior edición de la revista, mismo autor.



Figura 1. Ubicación de los terrenos de estudio (círculo amarillo S1, rojo S2 y verde S3).

La tabla 1 es un resumen de la caracterización. Se trata de un suelo agrícola limo arenoso de

baja plasticidad (ML), de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Tabla 1. Caracterización del suelo.

Suelo	Arcilla %	Limo %	Arena %	$\gamma_{KN/m^3}$	$G_s$	SUCS	Cont. Orgánico%
S1	8	48	44	17,0	2,64	ML	0,52
S2	10	52	38	17,2	2,65	ML	0,45
S3	8	50	42	16,7	2,65	ML	0,55

En cuanto al tractor agrícola, es de marca JOHN DEERE modelo 6110D, neumático modelo 13.6R24 en la rueda delantera, 18.4R34 en la rueda trasera. En la Tabla 2 se muestra las presiones de inflado que se han utilizado en el presente estudio (Torrice, 2022).

Tabla 2. Variación de la presión de inflado.

Tipo de Neumático	Presiones de inflado utilizadas		
	recomendada (KPa)	intermedia (KPa)	máxima (KPa)
13.6R24	83	138	193
18.4R34	83	110	138

### Mediciones “in situ” del incremento de los esfuerzos verticales.

Recurrir a la anterior edición de la revista, mismo autor (Torrice, 2022).

### Validación de las mediciones “in situ” del incremento de esfuerzos verticales

Recurrir a la anterior edición de la revista, mismo autor (Torrice, 2022).

### Monitoreo de la succión matricial

Recurrir a la anterior edición de la revista, mismo autor (Torrice, 2022). En la figura 2 se muestra la instalación de los tensiómetros junto a las células de carga en las profundidades predeterminadas.



Figura 2. Instalación de células de carga y tensiómetros.

### Procedimiento de los ensayos de campo

Recurrir a la anterior edición de la revista, mismo autor (Torrico, 2022). En la figura 3 se muestra una vista previa de uno de los ensayos de campo realizados.



Figura 3. Ensayo de campo.

## RESULTADOS

### Comparación entre mediciones en campo y soluciones analíticas

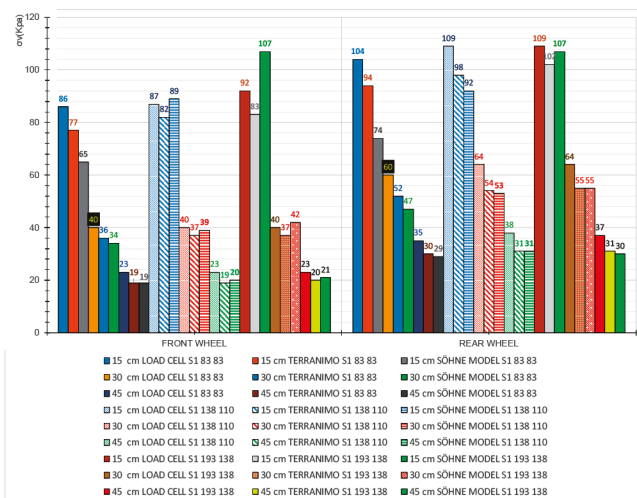


Figura 4. Suelo S1, variación del incremento de esfuerzo vertical.

Para el suelo S1, en la figura 4 se muestra los 54 resultados entre mediciones de campo y soluciones analíticas. Realizando un análisis comparativo y tomando como referencia al neumático delantero en las condiciones de presión de inflado recomendada de 83 KPa en ambos neumáticos (primeras 9 barras de

la izquierda): A la profundidad de 0.15 m, la medición en campo del esfuerzo vertical ha sido de 86 KPa, el resultado del software Terranimo ha sido de 77 KPa y el resultado de la solución de Söhne ha sido de 65 KPa; es decir las mediciones en campo proporcionan mayores resultados respecto a las soluciones analíticas. A la profundidad de 0.30 m, la medición en campo fue de 40 KPa, el resultado de TERRANIMO fue de 36 KPa y el resultado de Söhne fue de 34 KPa; se mantiene la sobre estimación de las mediciones de campo, pero la diferencia entre resultados es más estrecha (2 Kpa). A la profundidad de 0.45 m, la medición en campo fue de 23 KPa, los resultados que arrojaron TERRANIMO y Söhne han coincidido y fueron de 19 KPa; también se mantiene la sobreestimación y la igualdad. Generalizando para este caso, podemos decir que, a mayor profundidad de análisis existe más estrechez entre mediciones y soluciones analíticas.

El resto de las barras de la figura 4 corresponden al mismo ejercicio, pero para las otras condiciones de presión de inflado establecidas (Torrico, 2022).

Para generar una repetitividad de los resultados se ha aplicado el mismo procedimiento a los suelos S2 y S3 obteniendo el mismo comportamiento. Las figuras 5 y 6 muestran los resultados.

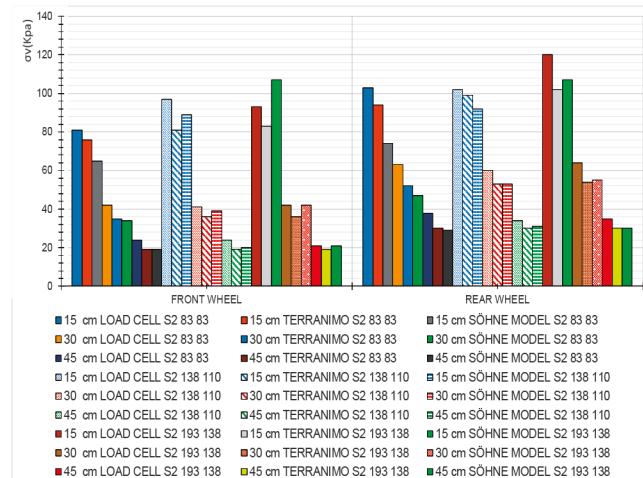


Figura 5. Suelo S2, variación del incremento de esfuerzo vertical.

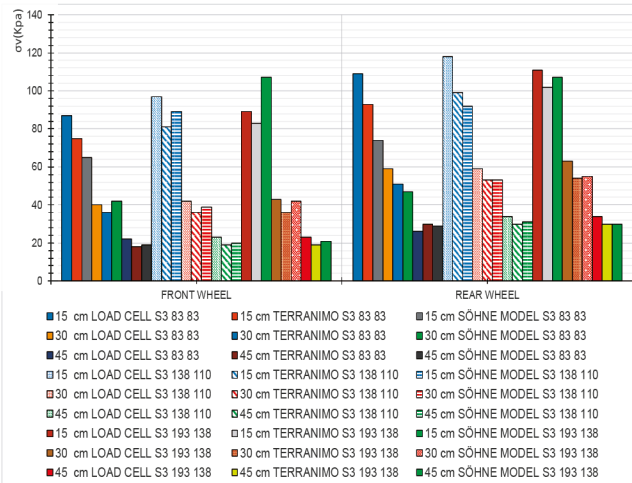


Figura 6. Suelo S2, variación del incremento de esfuerzo vertical.

### Variación de la succión matricial en los ensayos de los suelos S1, S2, S3

El monitoreo de la succión matricial se encuentra en la anterior edición de la revista, mismo autor (Torrico, 2022). La novedad del presente trabajo de investigación es conocer el efecto de la succión matricial en los esfuerzos verticales para cada ensayo de campo cuando se ha optado por variar la presión de inflado de los neumáticos. En este sentido se han preparado las siguientes tablas:

Tabla 3. Suelo S1, variación de la succión matricial registrada en las 3 pruebas de campo variando la presión de inflado.

No	Ensayo	Succión Matricial (kPa) registrada por profundidad			
		FW/RW	0.15m	0.30m	0.45m
1	83 83		38	33	30
2	138 110		38	33	30
3	193 138		38	33	30

La tabla 3 muestra los tres ensayos realizados en el suelo S1 variando la presión de inflado en los neumáticos delantero y trasero (FW y RW respectivamente), en el ensayo No. 1 se ha empleado una presión de inflado de 83 KPa en ambos neumáticos y se han registrado valores de la succión matricial de 38 KPa a 0.15 m, 33 KPa a 0.30 m y 30 KPa a 0.45 m de profundidad. En el ensayo No. 2 se ha incrementado la

presión de inflado a 138 KPa en el neumático delantero y 110 KPa en el neumático trasero, se han registrado las mismas succiones que en el ensayo No. 1. En el ensayo No. 3 se ha vuelto a incrementar la presión de inflado hasta 193 KPa en el neumático delantero y 138 KPa en el neumático trasero, se han registrado las mismas succiones que en los ensayos No. 1 y No. 2. Analizando el comportamiento de la succión en los tres ensayos del suelo S1, se observa que esta no ha experimentado variación alguna.

A continuación, en las tablas 4 y 5 se realiza el mismo ejercicio para los suelos S2 y S3 respectivamente; y se ha obtenido el mismo comportamiento de la succión matricial; es decir, esta no ha sufrido ninguna variación con el incremento de la presión de inflado de los neumáticos.

Tabla 4. Suelo S2, variación de la succión matricial registrada en las 3 pruebas de campo variando la presión de inflado.

No	Ensayo	Succión Matricial (kPa) registrada por profundidad.			
		FW/RW	0.15m	0.30m	0.45m
1	83 83		48	43	40
2	138 110		48	43	40
3	193 138		48	43	40

Tabla 5. Suelo S3, variación de la succión matricial registrada en las 3 pruebas de campo variando la presión de inflado.

No	Ensayo	Succión Matricial (kPa) registrada por profundidad.			
		FW/RW	0.15m	0.30m	0.45m
1	83 83		60	52	35
2	138 110		60	52	35
3	193 138		60	52	35

### Análisis de la presión de inflado con el incremento de los esfuerzos verticales

Para realizar este análisis, se disponen de mediciones en campo y soluciones analíticas del incremento de los esfuerzos verticales; por

este motivo se ha visto por conveniente utilizar el promedio de estos resultados (Torrico, 2022).

La figura 7 enseña para el suelo S1 la evolución del incremento de esfuerzos verticales con la presión de inflado de los neumáticos, los resultados mostrados en la figura 7 son el promedio de los resultados presentados en la figura 4 para cada caso. Como ejemplo, el primer resultado de 91 KPa que se muestra en la figura 7 es el promedio de los esfuerzos de 104 KPa (medición en campo), 94 KPa (Terranimo) y 74 KPa (solución de Söhne) que se han presentado en la figura 4 (primeras tres barras de los ensayos con el neumático trasero (sector REAR WHEEL).

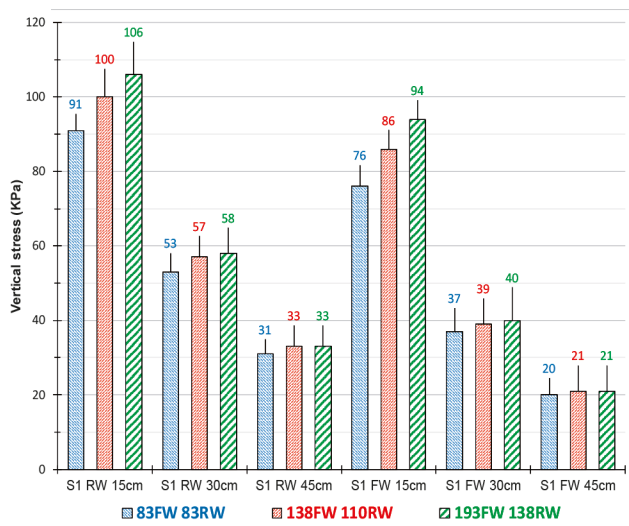


Figura 7. Suelo S1, variación de los esfuerzos verticales con la presión de inflado.

La figura 7 permite ver que en el suelo S1, a la profundidad de 0.15 m, en el neumático trasero (RW) del tractor, el incrementar la presión de inflado de 83 KPa a 138 KPa ha significado un incremento del esfuerzo vertical en el suelo de 91 KPa a 106 KPa; para el neumático delantero (FW), el incrementar la presión de inflado de 83 KPa a 193 KPa, ha significado un incremento del esfuerzo vertical de 76 a 94 KPa. A 0.30 m de profundidad, se ha producido un aumento del esfuerzo vertical más reducido: De 53 KPa a 58 KPa en el caso del neumático trasero, y de 37 KPa a 40 KPa en el caso del neumático delantero. A la profundidad de 0.45 m se ha producido un incremento del esfuerzo vertical más estrecho aún que las otras dos profundidades: De 31 KPa a 33 KPa en el caso del neumático trasero

y de 20 KPa a 21 KPa en el caso del neumático delantero. En las tres profundidades existe el común denominador de que el incremento de la presión de inflado genera incremento del esfuerzo vertical.

Para analizar la variación del esfuerzo vertical en el resto de los suelos S2 y S3, se ha empleado el mismo procedimiento utilizando las figuras 5 y 6 del presente trabajo. A continuación, en las figuras 8 y 9 se muestran los resultados, obteniéndose el mismo comportamiento identificado y explicado en los resultados del suelo S1.

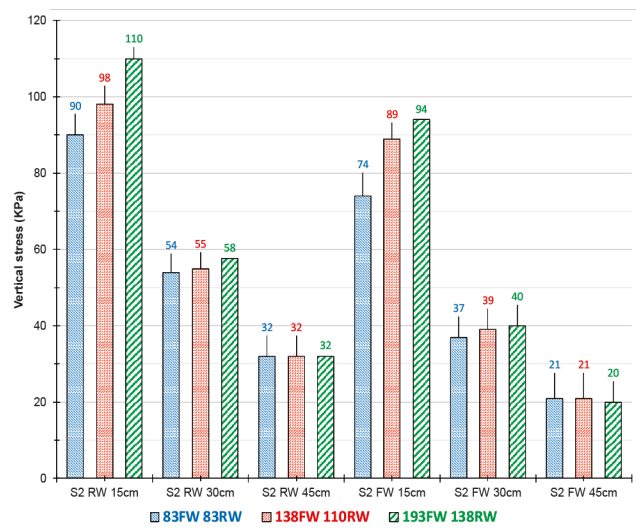


Figura 8. Suelo S2, variación de los esfuerzos verticales con la presión de inflado.

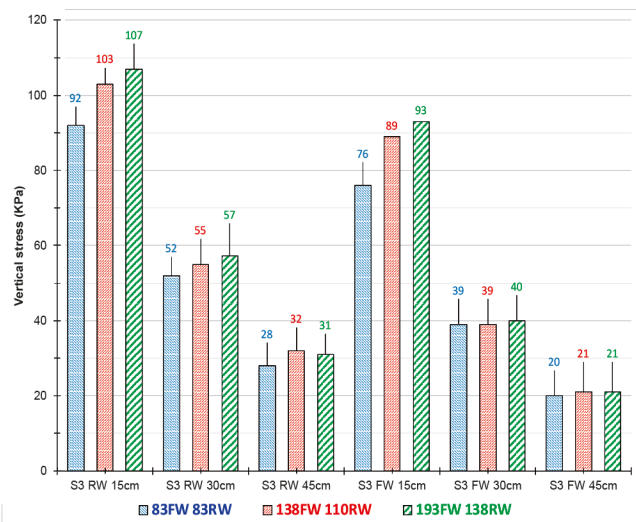


Figura 9. Suelo S3, variación de los esfuerzos verticales con la presión de inflado.

En la figura 8, a diferencia de las figuras 7 y 9, se ha identificado el mayor incremento de esfuerzos verticales a la profundidad de 15 cm que es de 20 KPa (de 90 a 110 KPa), que no difiere mucho con el suelo S1 (15 KPa) y el suelo S3 (15 KPa).

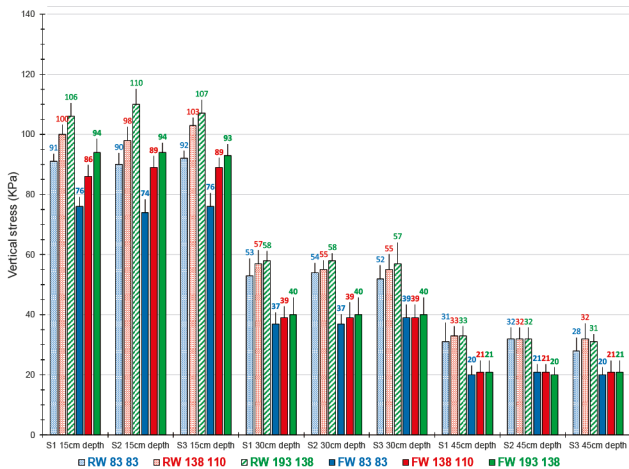


Figura 10. Suelos S1, S2, S3, propagación de esfuerzos verticales según presión de inflado.

La figura 10 muestra un compendio de todos los resultados obtenidos en cuanto a la propagación de esfuerzos verticales, aquí se observa claramente en los 3 suelos (S1, S2, S3) como el incremento en la presión de inflado genera un incremento en la propagación de los esfuerzos verticales tanto en los neumáticos delanteros como en los neumáticos traseros y para todas las profundidades de análisis. Por ejemplo, en el suelo S2 a 0.15 m de profundidad, la variación de la presión de inflado en el neumático trasero desde la presión recomendada de 83 KPa a 138 KPa ha producido un incremento en la propagación de los esfuerzos verticales de 90 KPa a 110 KPa (ver barras con líneas oblicuas azul, rojo y verde del tramo "S2 15cm depth" del gráfico); respecto al neumático delantero, la variación de la presión de inflado de 83 KPa a 193 KPa ha generado un incremento en la propagación de esfuerzos verticales de 74 KPa a 94 KPa (ver barras de color azul rojo y verde del tramo "S2 15cm depth" del gráfico). También, para el mismo caso, si se compara la propagación de esfuerzos verticales por neumático del tractor agrícola, la figura 10 también muestra que en el neumático trasero la propagación de esfuerzos

es mayor (110 KPa en la condición de presión de inflado máxima) que en la del neumático delantero (94 KPa en la condición de presión de inflado máxima).

La figura 10 además muestra el cómo, independientemente de las condiciones de presión de inflado empleadas, la propagación de esfuerzos verticales se va estrechando a medida que la profundidad de análisis va aumentando: En el lado izquierdo de la figura se encuentran los resultados de esfuerzos verticales a la profundidad de 0.15 m y se observa una brecha bien definida entre ensayos que ha llegado hasta los 20 KPa en el caso del suelo S2 tanto para el neumático delantero como para el trasero. A medida que se recorre hacia la derecha en la figura, la profundidad de análisis va aumentando y esa brecha va decreciendo. En la figura 10 se muestra que, a la profundidad de 0.45 m la brecha ha disminuido hasta 1 KPa (de 20 a 21 KPa) en el caso del neumático delantero en los 3 suelos ensayados S1, S2, S3, mientras que para el neumático trasero esa brecha ha alcanzado un valor nulo en el suelo S2. De ahí que, en el lado derecho de la figura, se observan grupos de 3 barras de casi la misma altura (en el tramo "S2 45cm depth" de la figura).

### Efecto de la succión matricial en el incremento de esfuerzos verticales

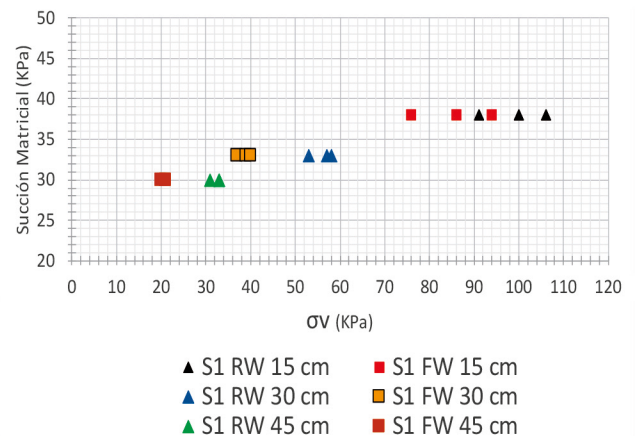


Figura 11. Suelo S1, variación de la succión matricial con el incremento del esfuerzo vertical.

La figura 11 muestra que, para cada profundidad de análisis, la succión matricial se mantiene

intacta con el incremento de esfuerzos verticales tanto en el neumático delantero como en el neumático trasero. Por ejemplo, a la profundidad de 0.15 m el esfuerzo vertical ha variado con la presión de inflado en 76 KPa, 86 KPa y 94 KPa para el neumático delantero (marcadores cuadrados de color rojo leyenda "S1 FW 15cm"); pero la succión matricial se ha mantenido constante en un valor de 38 Kpa

Ha acontecido el mismo comportamiento con el neumático trasero del tractor (leyenda "S1 RW 15cm"), como se puede ver en los marcadores triangulares de color negro: El esfuerzo vertical ha variado en 91 KPa, 100 KPa y 106 KPa, pero la succión matricial se ha mantenido constante en 38 Kpa. La figura 11 también muestra que la succión matricial está disminuyendo con la profundidad de análisis: A 0.15 m de profundidad la succión es de 38 KPa, a 0.30 m, 33 KPa y a 0.45 m, 30 KPa; esto da a entender la presencia de una mayor humedad a 0.30 m y 0.45 m.

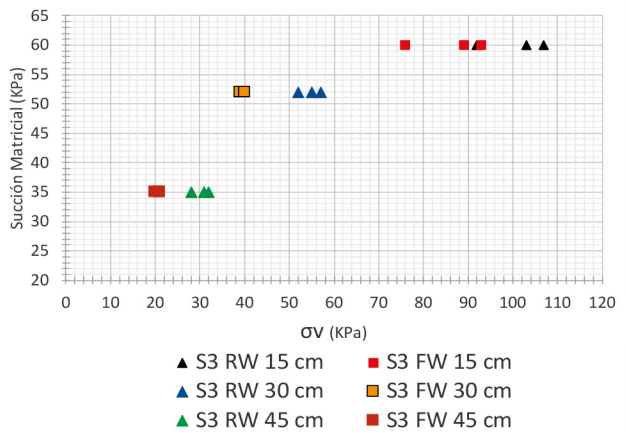


Figura 13. Suelo S3, variación de la succión matricial con el incremento del esfuerzo vertical.

En las figuras 12 y 13 se muestra la variación de la succión con el incremento del esfuerzo vertical en los suelos S2 y S3, se ha obtenido el mismo comportamiento estable de la succión para toda variación del esfuerzo vertical debido al cambio de la presión de inflado de los neumáticos. Cabe hacer notar que las succiones matriciales en estos suelos han sido superiores que en el suelo S1 para una misma condición.

Finalmente, con los resultados de la figura 10 y de las figuras 11, 12 y 13, se ha llegado a conformar la siguiente figura 14, que nos permite evaluar el efecto de la succión matricial en el incremento de esfuerzo vertical:

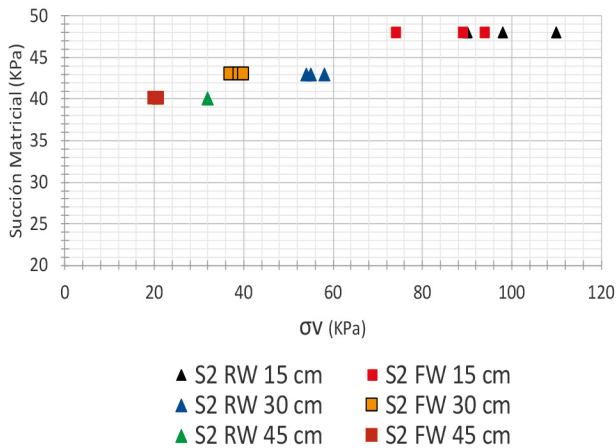


Figura 12. Suelo S2, variación de la succión matricial con el incremento del esfuerzo vertical.

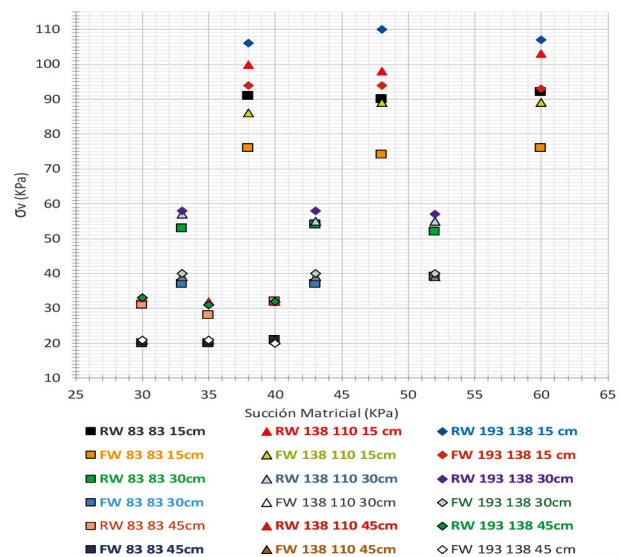


Figura 14. Efecto de la succión matricial en el incremento de los esfuerzos verticales.



Utilizando la figura 14, tomando como ejemplo los resultados del marcador de color naranja (FW 83 83 15cm) que corresponden a los 3 ensayos realizados en condiciones de presión de inflado recomendada (83 KPa aplicados al neumático delantero y 83 KPa al neumático trasero) para el neumático delantero (FW) a una profundidad de 0.15 m, se aprecia que la succión ha experimentado valores de 38 KPa en el caso del suelo S1, 48 KPa en el suelo S2 y 60 KPa en el suelo S3. En el caso del esfuerzo vertical, se observa que se ha generado un valor de 76 KPa en el suelo S1, 74 KPa en el suelo S2 y nuevamente 76 KPa en el suelo S3. Comparando los resultados de la succión matricial, esta ha variado en 10 Kpa, del suelo S1 al suelo S2, y 22 KPa, en lo que respecta del suelo S1 al suelo S3; es decir la succión ha experimentado una variación en 22 KPa en estos tres ensayos. Respecto a los resultados del incremento del esfuerzo vertical, este ha decrecido en 2 KPa, del suelo S1 al suelo S2, y se ha mantenido constante, en lo que respecta del suelo S1 al suelo S3; es decir el incremento del esfuerzo vertical ha experimentado una variación en 2 KPa en estos tres ensayos. Es decir, 22 Kpa de variación en la succión matricial han tenido un efecto prácticamente nulo de 2 KPa en el incremento de los esfuerzos verticales. En el resto de los resultados, se ha identificado el mismo comportamiento tal y como se puede apreciar en la Figura 14; de manera que, si trazáramos líneas de tendencia para cada caso planteado, estas líneas serían prácticamente horizontales por la baja o casi nula influencia de la succión matricial en el incremento de esfuerzos verticales.

Entonces, la figura 14 muestra que, para unas mismas condiciones de ensayo, pero en suelos distintos, el efecto de la succión matricial en el incremento de los esfuerzos verticales es pequeño o prácticamente nulo, esto para todas las condiciones de presión de inflado definidas; incluso se puede apreciar que para las succiones matriciales máximas registradas que han llegado a importantes valores de 60 KPa, esto no ha significado variación importante en el incremento de los esfuerzos verticales.

De manera que, la variación en la succión matricial identificada en estos ensayos ha influido mínimamente en el incremento de los esfuerzos verticales.

## CONCLUSIONES

La presente investigación concluye que, la succión matricial registrada en campo con los tensiómetros Red Fill, que ha variado en los tres terrenos de experimentación seleccionados S1, S2 y S3, no ha tenido un efecto significativo en el incremento de los esfuerzos verticales que se han alcanzado en los nueve ensayos de campo realizados variando la presión de inflado (condiciones de presión recomendada, intermedia y máxima) de los neumáticos del tractor agrícola modelo John Deere 6110 D en la localidad de Tarabuco.

El mayor efecto de la succión matricial que se ha identificado, en los ensayos realizados en el presente trabajo de investigación, ha sido a la profundidad de quince centímetros de estudio, en el neumático trasero (RW) y con las condiciones de presión de inflado intermedia (138 KPa para el neumático delantero y 110 KPa para el trasero) y presión de inflado máxima (193 KPa para el neumático delantero y 138 KPa para el trasero). En el ensayo a condiciones de presión de inflado intermedia, el efecto de la succión ha generado una variación en el incremento de esfuerzos verticales de 5 KPa, que representa un porcentaje de variación del esfuerzo del 4.98 %, que es muy reducido en comparación a la magnitud de los esfuerzos obtenidos. En el ensayo realizado en condiciones de presión de inflado máxima, el efecto de la succión matricial ha generado una variación una variación en el incremento de los esfuerzos verticales de 4 KPa, que representa un porcentaje de variación del esfuerzo vertical del 3.72 %, variación poco ponderable en comparación a la magnitud de los esfuerzos obtenidos en estas condiciones de ensayo.

En el resto de los ensayos realizados en el presente trabajo de investigación, los resultados proporcionan aún menores valores del

incremento del esfuerzo vertical por efecto de la succión matricial, en los cuales su variación oscila en el rango de cero a tres kilo pascales. De todos estos resultados, merecen la mención especial tres ensayos en los cuales se ha identificado una nula variación del incremento del esfuerzo vertical, es decir 0 Kpa. En estos ensayos la succión matricial ha tenido un efecto nulo en el incremento de los esfuerzos verticales. Estos ensayos corresponden al neumático delantero (los tres), a las profundidades de 30 centímetros (dos) y 45 centímetros (uno) y en las condiciones de presión de inflado intermedia (dos) y máxima (uno) y están identificados a lo largo de todo el trabajo como los ensayos FW 138 110 30cm, FW 193 138 30cm y FW 138 110 45cm.

Por otro lado, si tomamos en cuenta la variación de succión matricial registrada por profundidad e lo largo de los tres terrenos de experimentación, esta tampoco ha representado ningún efecto en el incremento de los esfuerzos verticales obtenidos. Se hace notar que todos los ensayos han sido conducidos en condiciones ambientales de clima seco.

Resulta importante hacer notar en el presente trabajo que la profundidad en la que se ha registrado el mayor efecto de la succión matricial en el incremento del esfuerzo vertical, ha sido la profundidad de quince centímetros. La mayor variación del incremento de los esfuerzos verticales con la presión de inflado de los neumáticos, que ha sido ampliamente desarrollada en la anterior edición de esta revista (Torrico, 2022) también se ha identificado a esta profundidad de quince centímetros. Por lo tanto, la profundidad crítica de análisis en este trabajo ha sido la profundidad de quince centímetros, esto por ser la más superficial.

El presente trabajo de investigación está enfocado en los suelos agrícolas de Tarabuco, sin embargo, este tiene una gran aplicación en el campo de la ingeniería civil en el sentido que la succión matricial se considera como una medición indirecta de la resistencia a la tracción del suelo, y es un aporte más para comprender la capacidad del suelo para mantener esfuerzos de tracción sin perder su estabilidad, en especial

en el momento de la acción de cargas externas. Con la comprensión de este fenómeno es posible diseñar y construir estructuras, en todas las áreas de la ingeniería civil, que van a poder soportar condiciones ambientales variables en su etapa de operación, conllevando a ser una herramienta más para la ejecución de proyectos civiles más seguros y sostenibles.

Para futuras investigaciones, de acuerdo con el diseño experimental de nuestro estudio de doctorado, se tiene planificado realizar la modelación de los estudios de campo conducidos en el presente trabajo, pero ahora utilizando el software PLAXIS 2D. Para conducir esta actividad, previamente se realizarán estudios de laboratorio con el equipo triaxial de suelos no saturados para determinar el módulo elástico del suelo analizado y también su coeficiente de poisson, pues estas propiedades mecánicas del suelo son parámetros de entrada que este software avanzado requiere, a diferencia del software Terranimo y la solución de Söhne. También se tienen planificado realizar ensayos de presión de consolidación para compararlos con los resultados proporcionados por el software TERRANIMO y verificar si los estados tensionales del esfuerzo vertical alcanzados en el suelo con el paso del tractor agrícola, provocan que este perfil de suelo analizado permanezca en estado elástico o ingrese en un estado plástico. Finalmente, se tiene planificado seguir el mismo procedimiento experimental, pero ahora en condiciones saturadas, es decir después de una lluvia y comparar los resultados de ambos estudios en condiciones ambientales seca y húmeda.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación ha sido financiado por la cooperación internacional VLIR-UOS (Consejo Flamenco de Interuniversidades para la cooperación y el desarrollo). Agradecemos a VLIR-UOS por el financiamiento bajo el proyecto de investigación VLIR ZEIN2016PR416-75155. El terreno para realizar los ensayos, así como el tractor agrícola utilizado en los ensayos con las células de

carga, han sido gentilmente facilitados por la Honorable Alcaldía del Municipio de Tarabuco.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hartge, K. H. & Horn, R. (2016). *Essential Soil Physics* 1<sup>st</sup> Edition. Gulde-Druck GmbH & Co. KG. **ISBN 978-3-510-65289-1**.

Torrigo, J.A., Di Emidio, G., Cornellis, W., Rojas, J.C., & Bezuijen, A. (2022). Efecto de la presión de los neumáticos en la distribución de esfuerzos verticales generados por el paso de un tractor en un perfil limo arenoso. **3**, 37-45. **ISSN 2709-7048**.

Lamandé, M., and Schjfnning, P. (2011). Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: Site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage. *Soil Till. Res.* **114**, 57-70, doi: [10.1016/j.still.2011.05.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2011.05.004).

Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Mounkholm, L., and Lamandé, M. (2019). The contribution of the tyre evolution to the reduction of soil compaction risks. *Soil Till. Res.* **194**, 104283, doi: [10.1016/j.still.2019.05.029](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.029).

DEERE & COMPANY. (2008). *Manual del operador tractores 6100D, 6110D, 6115D, 6125D, 6130D y 6140D Edición H8 (español)*. Industrias John Deere S.A. de C.V. **A John Deere ILLUSTRATION Manual**.

FIRESTONE AGRICULTURAL & TRACTOR TIRES. (2020). Load and inflation. **FirestoneAg.com**.

Torrigo, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2021). Matric suction effect on distribution of stresses caused by vehicle wheels on a bare silty sand. *PanAm-Un-*

*sat* 2021: 3<sup>rd</sup> Pan-American Conference on Unsaturated Soils. **337**, 03004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133703004>

Torrigo, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2020). Medición del incremento de esfuerzos verticales generados por un vehículo en una arena limosa. *Ingenium*. **1**, 123-128.

López, R. (2020). Prevention of soil compaction by agricultural operations: a geotechnical perspective. Master Thesis. **Ghent University**, Faculty of Engineering and Architecture. Ghent, Belgium.

Söhne, W. (1958). Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. *Agricultural Engineering*. **39**, 276-281 290.

Torrigo, J.A., Miranda, S., Cornellis, W., Rojas, J.C., Di Emidio, G., & Bezuijen, A. (2021). Efecto de la succión matricial en la distribución de esfuerzos verticales generados por el paso de un vehículo en una arena limosa bajo diferentes condiciones ambientales. *Ingenium*. **2**, 15-21.

Lamandé, M., Keller, T., Berisso, F., Stettler, M., and Schjfnning, P. (2015). Accuracy of soil stress measurements as affected by transducer dimensions and shape. *Soil Till. Res.* **145**, 72-77, doi: [10.1016/j.still.2014.08.011](https://doi.org/10.1016/j.still.2014.08.011).