

Tema A1a. Diseño Mecánico: *Sistemas biónicos agrícolas*

“Evaluación numérica de un subsolador biónico inspirado en el armadillo de nueve bandas (*Dasyus novemcinctus*)”

Quirino Estrada^a, Elva Reynoso^a, Dariusz Szwedowicz^b, Jesús M. Silva^a, Rodolfo Mancilla^c, Lara C. Wiebe^a, Elifalet López^a, Julio Vergara^b, Oliver F. Marquez^a

^aInstituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Av. Plutarco Elías Calles Num. 1210, C.P 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

^bCentro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira, CP. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.

^cInstituto Tecnológico de Tlalnepantla, Tlalnepantla de Baz, Estado de Mexico, México.

*Autor contacto. Dirección de correo electrónico: quirino.estrada@uacj.mx

RESUMEN

Se presenta la evaluación numérica de un diseño de subsolador biónico para labores de labranza empleando el método de elemento finito. El diseño está inspirado en la forma de la garra de un armadillo de nueve bandas y tiene como objetivo la fragmentación efectiva del suelo a partir de la reducción de la fuerza de fricción y adherencia con la herramienta de corte. El perfil de la garra se obtuvo a través de técnicas CAD. Posteriormente se desarrolló un modelo discreto del subsolador inspirado en la morfología de la garra utilizando el software de elementos finitos Abaqus. La interacción entre el suelo y subsolador se obtuvo a partir del modelo de Drucker Prager. La efectividad del diseño biónico se corroboró a través de la comparación de los resultados obtenidos para un subsolador convencional. Como conclusión el diseño biónico presentó una reducción del 36.6% y 58% de la fuerza de arrastre y fuerza vertical, respectivamente

Palabras Clave: Subsolador, diseño biónico, labranza, *Dasyus novemcinctus*, elemento finito

ABSTRACT

The numerical evaluation of a bionic subsoiler for tillage operations using the finite element method is presented. The design is inspired by the claw of a nine-banded armadillo and aims to the effective soil fragmentation by reduce the friction resistance and adherence with the tillage tool. The profile of the claw was obtained by CAD techniques. Later, a discrete model of the subsoiler inspired in the morphology of the claw was developed using Abaqus finite element software. The interaction between the subsoiler and soil was obtained by the Drucker Prager model. The effectiveness of the bionic design was corroborated by the comparison with the results obtained for a conventional subsoiler. As conclusion, a decrease of 36.6 % and 58 % for the drag force and vertical force, respectively were obtained for the bionic design.

Keywords: Subsoiler, bionic design, tillage, *Dasyus novemcinctus*, finite element

1. Introducción

Cada año la compactación de los suelos para la agricultura se incrementa extendiéndose hasta una profundidad de 250 mm ocasionado por el tráfico de maquinaria agrícola [1]. Dicha acción provoca una capa del suelo denominado horizonte con poca permeabilidad, induciendo a un crecimiento pobre de las plantas. Con el objeto de propiciar condiciones óptimas para la germinación y crecimiento saludable de las plantas es necesario el corte y/o fragmentación de esta capa de suelo a través de técnicas de labranza [2]. Para tal propósito el uso de sistemas mecánicos denominados subsoladores son implementados. Durante la interacción con el suelo, el subsolador se ve afectado por fuerzas inerciales y de fricción que provocan concentración de esfuerzos. Como consecuencia se presenta la aparición de

deformaciones plásticas, falla y posterior fractura. Con el objeto de optimizar el proceso de labranza, así como los diseños de los subsoladores las técnicas computacionales como el método de elemento finito [FEM] está en incremento [3]. Dentro de los principales parámetros evaluados computacionalmente se encuentran análisis estructurales [4], análisis de interacción suelo/subsolador [5] y estudios geométricos [6]. Adicional al FEM, y con el objeto optimizar la geometría de la herramienta de labranza/corte el empleo de sistemas biónicos está cobrando importancia. La biónica en términos generales consiste en la aplicación de métodos y patrones biológicos encontrados en la naturaleza a la ingeniería y tecnología [7]. Para el caso específico de subsoladores, la biónica propone diseños inspirados en garras o extensiones de animales especializados en la excavación. Tal acción se justifica en el hecho de que la morfología actual de garras y extensiones

son producto de años de evolución. En este sentido, las garras de animales tales como osos, armadillos, pangolines y topos pueden remover gran cantidad de suelo con un mínimo gasto de energía. Tomando en cuenta lo anterior Li et al. [8] modelaron la interacción entre la garra de un oso negro y el suelo utilizando el método de elemento discreto (DEM). En el estudio se evaluaron las fuerzas de corte en el suelo y la remoción del mismo. Como resultado determinaron que el mejor ángulo de inclinación de la garra fue de 30°. Ji et al. [9] realizaron un análisis experimental para evaluar el desempeño de las garras de topos tipo rata en el proceso de corte de la tierra. Determinaron que las tres garras centrales repercuten más en el proceso de corte. De igual forma demostraron que los diseños biónicos presentan un 12.8% menos resistencia que especímenes convencionales. Por su parte Li et al. [10] utilizando el método de elemento finito diseñaron un disco biomimético de rastreo. El diseño del disco se inspiró en la forma de la garra de un topo rata. De acuerdo con los resultados numéricos el disco biomimético presentó una disminución de esfuerzos del orden 3.33% respecto a discos de rastreo convencionales. Así como una mayor eficiencia para el corte del suelo. Considerando subsoladores biónicos Sun et al. [11] realizaron simulaciones DEM para evaluar el desempeño de elementos estructurales biónicos inspirados en la estructura plaicoide de la piel de tiburón. Durante el análisis se diseñaron seis tipos de subsoladores biónicos. De acuerdo con los resultados numéricos los diseños biónicos presentaron una reducción la fuerza de arrastre de hasta 21.9%. Por otra parte, una reducción en el consumo de energía de hasta 24.8% fue calculada. Finalmente, tal y como se ha descrito el diseño biónico es una técnica efectiva para el diseño de maquinaria agrícola. Sin embargo, es una técnica poco explorada a pesar de las grandes ventajas que ofrecen respecto a diseños agrícolas convencionales.

El presente artículo propone el diseño biónico de un subsolador de labranza agrícola utilizando el método de elemento finito. El diseño fue inspirado en la morfología de la garra de un armadillo de nueve bandas (*Dasyus novemcinctus*). Durante la evaluación se modeló la interacción de la herramienta de corte con el suelo. Especial énfasis se puso en el modelado de la mecánica del suelo a través del modelo lineal extendido de Drucker Prager.

2. Inspiración biónica: garra de armadillo de nueve bandas (*Dasyus novemcinctus*)

Los armadillos son pequeños mamíferos que pertenecen al orden *Xenarthra* y familia *Dasyopidae*. Caracterizados por poseer un caparazón y habilidad para excavar están emparentados con el armadillo prehistórico *Glyptodon*. Existen 20 especies de armadillos sin embargo el armadillo de nueve bandas (*Dasyus novemcinctus*) es el único que se extiende en la mayor parte del territorio mexicano exceptuando la península de Baja California y el altiplano central [12]. Millones de años de evolución han modificado la morfología de los armadillos de nueve bandas. Sin embargo, la forma curva y afilada sus garras presenta una

mayor especialización para actividades de excavación y remoción durante la construcción de sus madrigueras (ver Figura 1). Los armadillos poseen cuatro garras en sus extremidades frontales y cinco en las posteriores. Durante el proceso de corte y remoción de la tierra, las garras centrales cobran mayor relevancia [12]. Considerando lo anterior, el diseño del subsolador presentado en este trabajo se basa en el segundo miembro central.

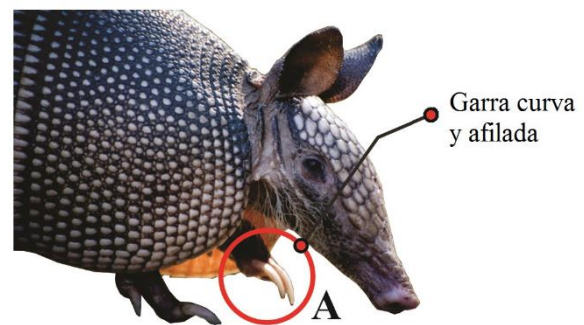


Figura 1 – Armadillo de nueve bandas (*Dasyus novemcinctus*) [13]

La Figura 2 muestra el perfil geométrico de la garra la cual se obtuvo a partir de una nube de puntos utilizando la plataforma SolidWorks®.

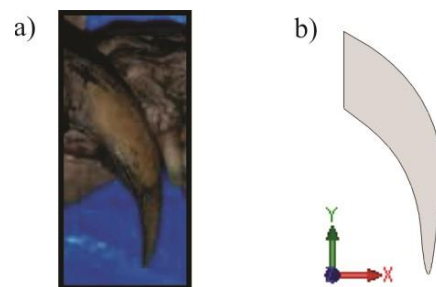


Figura 2 – Modelo CAD del perfil de la segunda garra frontal para armadillo de nueve bandas [14]

3. Mecánica del suelo, modelado e interacción suelo/herramienta de corte

El suelo es un material poroso multifase producto de meteorización de las rocas. Generalmente está compuesto por partículas sólidas, líquidas y gas [15]. A partir de tal composición su comportamiento mecánico es más complejo respecto a materiales convencionales de la ingeniería. Referido comportamiento está caracterizado por una alta no linealidad con deformaciones elásticas y plásticas [15]. En consecuencia, diversos modelos constitutivos han sido desarrollados.

Sin embargo, el modelo lineal extendido de Drucker-Prager (DPE) es uno de los más efectivos [16]. Por tanto, éste será empleado en el modelado de la mecánica suelo del presente artículo. El modelo de DPE asume que la fluencia del material es dependiente de la presión aplicada (el material se endurece al aplicar mayor presión). Tal característica permite al material endurecerse o ablandarse isotrópicamente. El modelo lineal extendido de Drucker Prager está definido por [17]:

$$F(\sigma_1, \sigma_1, \sigma_1) = t - p \tan \beta - d = 0 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde F es la función de fluencia, $(\sigma_1, \sigma_1, \sigma_1)$ esfuerzos principales, t el esfuerzo desviador, p es el esfuerzo normal que actúa sobre el suelo, β es el ángulo de fricción interna y d cohesión del material. Los parámetros t , p y q están definidos en las Ec. 2-5 [17].

$$t = \frac{1}{2} q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad \text{Ec. 2}$$

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{Ec. 3}$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad \text{Ec. 4}$$

$$r^3 = -(\sigma_1 - \sigma_3)^3 = -q^3 \quad \text{Ec. 5}$$

Por su parte K es el coeficiente que relaciona los esfuerzos triaxiales a tensión y a compresión y r es la tercera invariante de los esfuerzos desviadores. Para el caso específico del presente artículo la Tabla 1 presenta los parámetros requeridos para el modelado por elemento finito del suelo [17].

Tabla 1 – Parámetros de las propiedades del suelo [17]

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad [ρ]	1731	kg/m ³
Módulo de Young [E]	8.067	MPa
Coefficiente de Poisson [ν]	0.3	-
Angulo de fricción [β]	42	°
Angulo de dilatación [ψ]	0	°
Relación de esfuerzos [K]	1	-
Cohesión	15.5	kPa

Respecto a la herramienta de corte (subsolador) se modeló con propiedades elasto-plásticas para el acero las cuales son descritas en la Tabla 2.

Tabla 2 – Propiedades mecánicas para el subsolador/acero

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad [ρ]	7850	kg/m ³
Módulo de Young [E]	200	GPa
Coefficiente de Poisson [ν]	0.3	-
Esfuerzo de fluencia	250	MPa

4. Diseño conceptual del subsolador biónico

A partir del perfil de la garra del armadillo de nueve bandas (*Dasyus novemcinctus*) se propone el diseño de un subsolador biónico. A diferencia de los subsoladores tradicionales, las púas o puntas forman parte del cuerpo del subsolador integrándose en un solo elemento estructural. Durante el diseño los elementos de sujeción para la conexión con el tractor no fueron considerados. Detalles de la geometría se presentan en la Figura 3, donde α representa el ángulo de ataque.

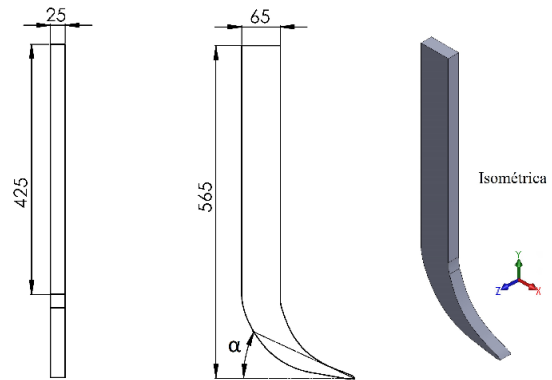


Figura 3– Diseño conceptual del subsolador biónico inspirado en armadillo *Dasyus novemcinctus*, unidades en mm

El diseño del subsolador biónico se comparó con un diseño convencional de subsolador cuyas características geométricas son presentadas en la Figura 4.

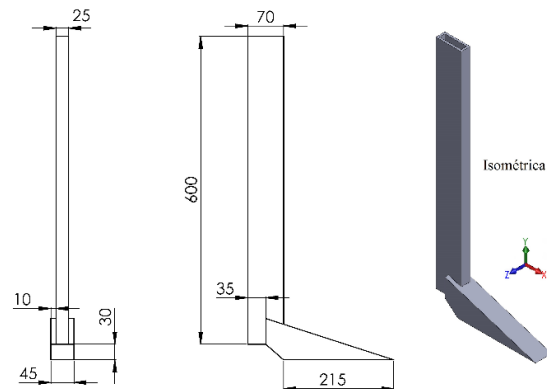


Figura 4– Geometría del subsolador convencional, (mm)

5. Modelo discreto

La efectividad del diseño biónico se evaluó en forma numérica usando el software de elementos finitos Abaqus/Explicit. Como primer paso se construyó un modelo discreto 3D base. El modelo representa el proceso de labranza, interacción herramienta de corte/suelo. Tanto el subsolador como el suelo se modelaron con elementos deformables C3D8R.

Para el caso de la herramienta de corte se aplicaron propiedades elasto-plásticas a través de modelos isotrópicos. Mientras que el comportamiento mecánico para el suelo se obtuvo a partir del modelo lineal extendido de Drucker Prager (DPE) descrito en la Sección 3. La interacción suelo/subsolador se modeló con un coeficiente de fricción de 0.42 [17] y un desplazamiento de 0.5 m. Detalles de las condiciones de frontera e interacciones se muestran en la Figura 5.

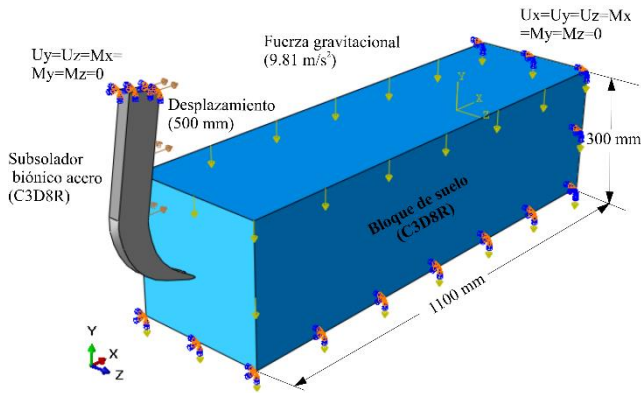


Figura 5- Modelo discreto del proceso de corte- subsolador/suelo

6. Simulaciones computacionales

El objetivo del presente artículo es evaluar numéricamente el desempeño de un subsolador biónico. Para tal objetivo diversas simulaciones computacionales fueron desarrolladas. Durante la evaluación fuerzas de arrastre (F_A) y verticales (F_V) fueron calculadas. Durante la evaluación diversos ángulos de inclinación de la herramienta de corte (λ) fueron analizados y comparados con los valores obtenidos para un subsolador convencional. En todos los casos se mantuvo un mismo valor de profundidad igual a 0.17 m. Detalles de la metodología de evaluación se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 – Metodología de evaluación

Código	Tipo de	λ	Profundidad [m]
C90	Convencional	90°	0.17
C75	Convencional	75°	0.17
C60	Convencional	60°	0.17
B90	Biónico	90°	0.17
B75	Biónico	75°	0.17
B60	Biónico	60°	0.17

7. Resultados

La evaluación del subsolador biónico se realizó a partir de la obtención de las fuerzas verticales (F_V) y de arrastre (F_A).

7.1. Subsolador biónico con $\lambda=90^\circ$, B90

La Figura 6 muestra el comportamiento de la fuerza de arrastre para el subsolador biónico con $\lambda = 90^\circ$. Dicho comportamiento es caracterizado por un incremento gradual de la fuerza hasta un valor máximo de 2.82 kN. Posteriormente referido valor se mantiene constante debido al endurecimiento del suelo a medida que la presión aumenta. Tal acción permite que el valor de F_A no disminuya. En este sentido la forma curva del subsolador permite una acción de corte debido a la modificación del ángulo de ataque obteniendo una disminución de la adherencia entre el material y la herramienta de corte.

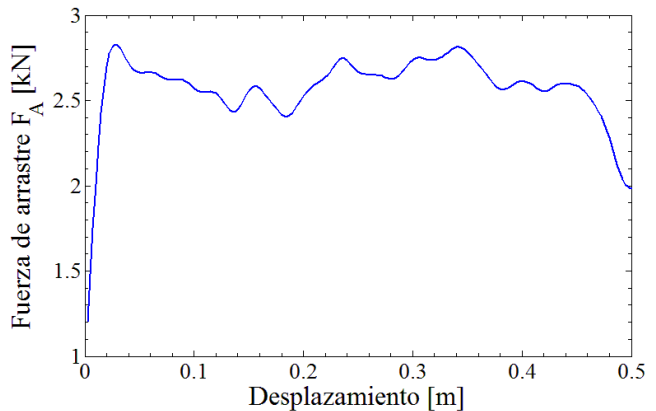


Figura 6- Fuerza de arrastre para subsolador B90

La fuerza vertical presenta un comportamiento mecánico similar a la fuerza de arrastre (ver Figura 7). Sin embargo, la magnitud de esta es mucho menor ($F_V \sim 0.4 \text{ kN}$). Tal resultado está en concordancia con lo reportado en [17] y es explicado a la menor interacción que tiene el subsolador con el suelo en dirección-y.

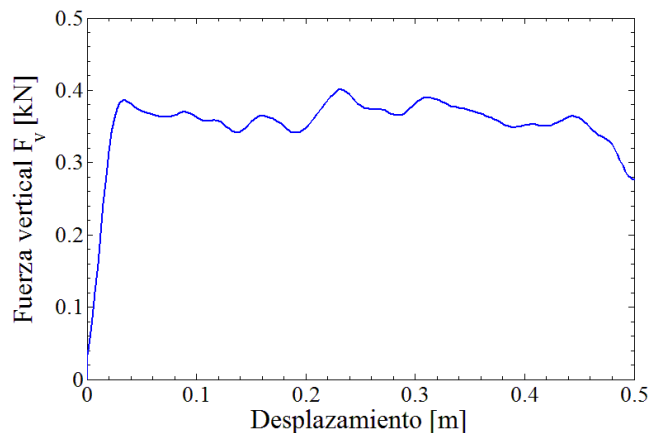


Figura 7- Fuerza vertical para subsolador B90

El modo de deformación del suelo se presenta en la Figura 8. Tal y como se espera al momento del contacto entre el subsolador y el suelo se producen las mayores deformaciones plásticas causadas por la acción de la curvatura de la garra. Sin embargo, a medida que se adentra en el suelo la remoción de material es menor y obedece a la acción de corte del perfil de la garra del armadillo. A partir de lo anterior se corrobora que la forma curva del subsolador permite una reducción de la fuerza de arrastre, así como de la fuerza vertical.

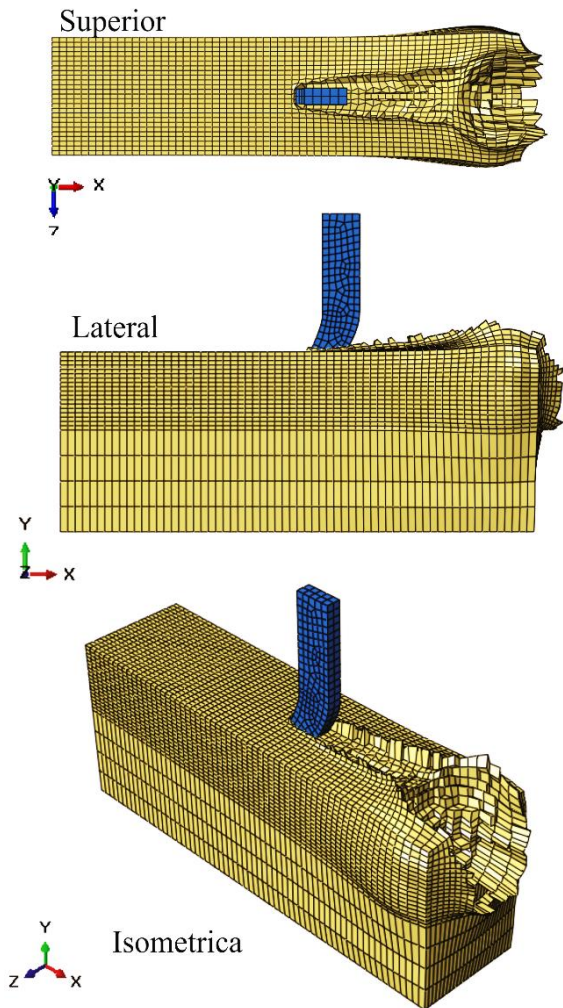


Figura 8– Interacción del suelo con el subsolador B90

7.2. Subsolador convencional con $\lambda=90^\circ$, C90

Considerando la misma orientación ($\lambda = 90^\circ$) que, en el subsolador biónico, la Figura 9 y 10 presentan el comportamiento de la fuerza de arrastre y vertical para el subsolador convencional C90. En ambos casos presentan un incremento gradual de las fuerzas hasta alcanzar un primer valor máximo de 2.75 kN el cual se mantiene aproximadamente constante hasta 0.2 m.

Posteriormente un aumento hasta 3.75 kN es alcanzado debido a la acción de compactación del suelo. Es decir, el efecto de la forma del subsolador no permite su libre movimiento. Consecuentemente, incrementos en las fuerzas del sistema son observados.

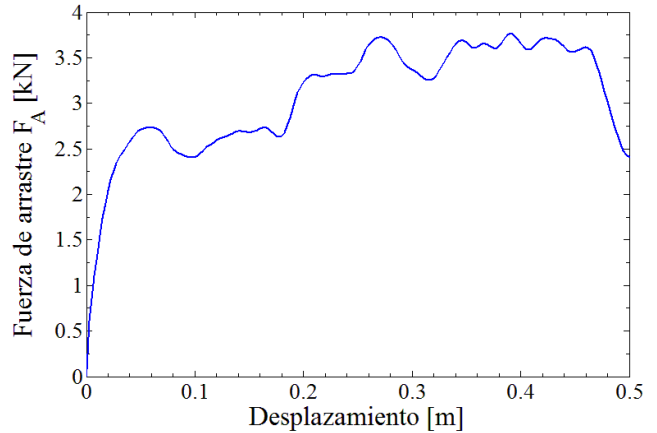


Figura 9– Fuerza de arrastre para subsolador C90

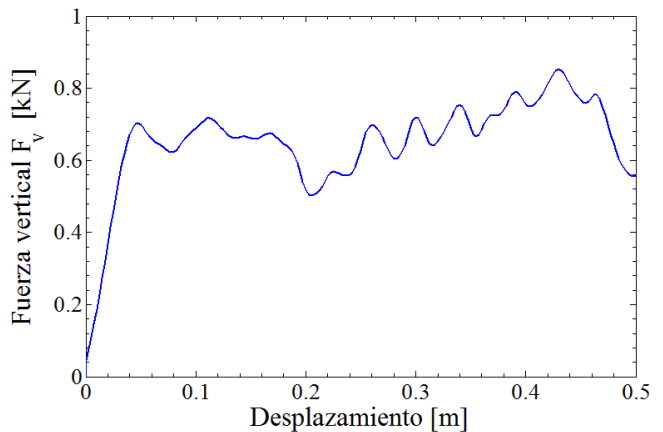


Figura 10– Fuerza vertical para subsolador C90

La forma de interacción entre el suelo y el subsolador convencional se presenta en las Figuras 11 y 12. A pesar de que existe deformación plástica y falla de los elementos finitos al inicio del evento. La vista superior muestra un menor efecto de remoción del suelo. En consecuencia, el material en contacto con el subsolador presenta un efecto combinado de corte con compactación. Por tanto, el desplazamiento del subsolador se hace más difícil aumentando los valores de las fuerzas de arrastre y vertical.

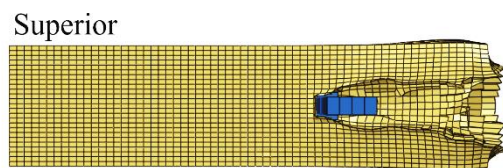


Figura 11– Vista superior del proceso de interacción suelo/subsolador convencional-C90

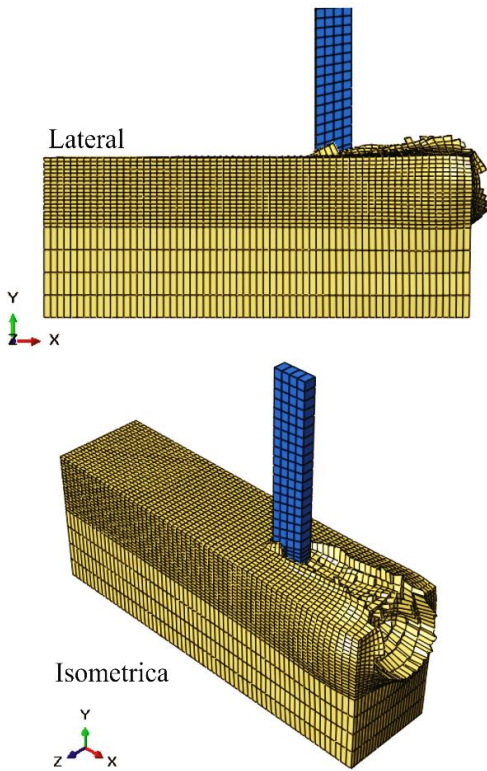


Figura 12– Proceso de interacción suelo/subsolador convencional-C90

7.3. Comparación de resultados entre subsolador biónico y convencional con $\lambda=90^\circ$

De acuerdo a los resultados obtenidos en las secciones 7.1 y 7.2, el desempeño del subsolador biónico inspirado en la garras de un armadillo de nueve bandas (*Dasypus novemcinctus*) es superior al subsolador convencional. El subsolador biónico presentó en el mejor de los casos una reducción de la F_A y F_v en un 36.6 % y 58% respectivamente. Adicionalmente de acuerdo con los estados de deformación del suelo (ver Figuras 8, 11 y 12) la forma curva de la garra del sistema bioinspirado presenta una mayor remoción de suelo. En términos prácticos esto significa la optimización de la actividad de labranza con un gasto menor de energía.

7.4 Efecto del ángulo de inclinación de la herramienta de corte (λ)

La efectividad del subsolador biónico también se analizó en función del ángulo de inclinación de la herramienta de corte (λ). Adicional a $\lambda = 90^\circ$ también se evaluaron valores de λ iguales a 75° y 60° . Las Figuras 13 y 14 presentan los modos de deformación para el subsolador biónico y convencional. Tal y como se observa en todos los ángulos para λ el subsolador biónico presenta una mayor remoción de material. Sin embargo, es mayor cuando $\lambda = 60^\circ$.

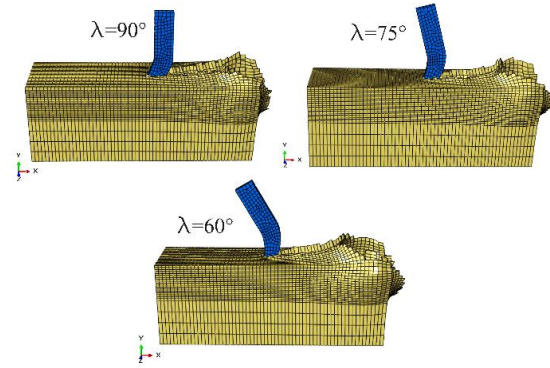


Figura 13– Estado de deformación del suelo al variar el ángulo (λ) en el subsolador biónico

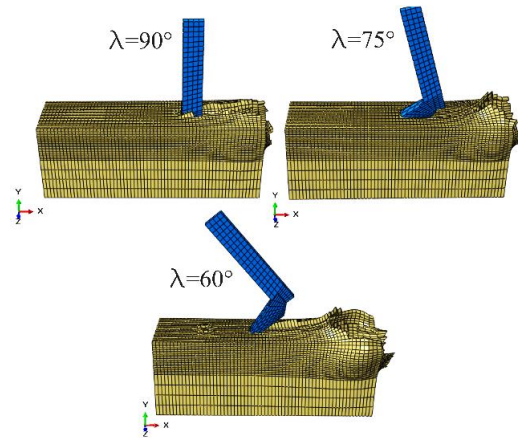


Figura 14– Estado de deformación del suelo al variar el ángulo (λ) en el subsolador convencional

El comportamiento de las fuerzas verticales y de arrastre se presenta en las Figura 15. En este sentido se hace notar que, para los ángulos analizados, se observa una disminución de las fuerzas de arrastre y verticales a medida que λ disminuye en un rango del 20-44%. Referido comportamiento se debe a una mayor acción de corte que da prioridad al movimiento y reduce el efecto de compactación del suelo. Así mismo la forma de la garra no permite la adherencia con el suelo reduciendo la fricción en las superficies de contacto.

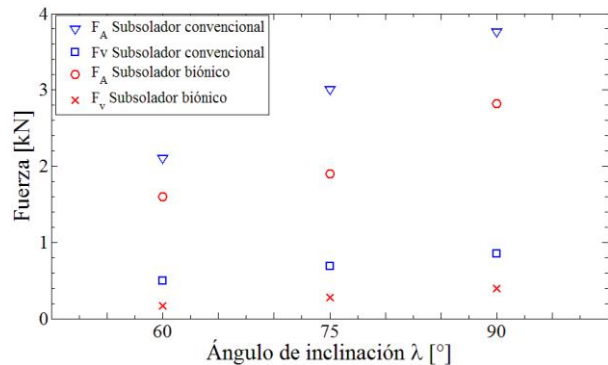


Figura 15– Efecto de λ en los valores de las fuerzas de arrastre y verticales para ambos subsoladores

Finalmente, para todos los valores de λ , el subsolador biónico presenta un mejor desempeño. Por tanto, la efectividad de la forma de este, inspirada en el armadillo de nueve bandas queda corroborada. Por consiguiente, el subsolador biónico permite una reducción de las fuerzas de arrastre y vertical con mayor remoción de material respecto al subsolador convencional.

3. Conclusión

En el presente trabajo se evaluó el desempeño de un subsolador biónico inspirado en el armadillo (*Dasyus novemcinctus*). A partir del presente análisis se determinó que:

El empleo de la biónica para el diseño de sistemas agrícolas fue corroborado. Considerando $\lambda = 90^\circ$ el subsolador biónico presento una reducción del 36.6 % de fuerza de arrastre (F_A) y un 58% de la fuerza vertical (F_v).

Se encontró que la forma curva y afilada del subsolador biónico propicia una mayor acción de corte que compactación del suelo a medida que se desplaza. Se observó que los valores de F_A y F_v son menores al calculado para el subsolador convencional.

El ángulo de inclinación de la herramienta (λ) es de suma importancia para la reducción de la adherencia y de la fuerza de fricción entre el subsolador y la herramienta de corte. En consecuencia, a medida que λ disminuye valores menores de F_A y F_v fueron calculados.

Adicionalmente se observó que a medida que λ disminuye se obtiene una mayor remoción de material en ambos subsoladores. Esto se debe a la modificación del ángulo de ataque, contribuyendo a una mayor acción de corte.

Finalmente se corroboró la efectividad del modelo lineal extendido de Drucker-Prager (DPE) para el modelado de las propiedades mecánicas del suelo.

REFERENCIAS

- [1] Mouazen, A. M., & Neményi, M. (1999). Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 51(1–2), 1–15.
- [2] Hang, C., Gao, X., Yuan, M., Huang, Y., & Zhu, R. (2017). Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler. *Biosystems Engineering*, 168, 73–82.
- [3] Mak, J., Chen, Y., & Sadek, M. A. (2012). Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction. *Soil and Tillage Research*, 118, 117–122.
- [4] Selvi, K. C. (2017). Investigation of the Structural Deformation Behaviour of the Subsoiler and Paraplow Tines by Means of Finite Element Method. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 5(12), 1482.
- [5] Ren, L. Q., Han, Z. W., Li, J. Q., & Tong, J. (2006). Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction. *Soil and Tillage Research*, 85(1–2), 1–12.
- [6] Mollazade, K., Jafari, A., & Ebrahimi, E. (2010). Application of Dynamical Analysis to Choose Best Subsoiler's Shape using ANSYS. *New York Science Journal*, 3(3), 93–100.
- [7] Ng, E. Y. K., Luo, Y., Sun, J., Zhang, Z., Tong, J., & Jia, H. (2016). Application of Bionic Technologies for Soil-Engaging Tillage Components in Northeast China. *Bio-Inspired Surfaces and Applications*, 555–578.
- [8] Li, B., Chen, Y., & Chen, J. (2016). Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM). *Soil and Tillage Research*, 158, 177–185.
- [9] Ji, W., Chen, D., Jia, H., & Tong, J. (2010). Experimental investigation into soil-cutting performance of the claws of mole rat (*Scaptochirus moschatus*). *Journal of Bionic Engineering*, 7(SUPPL.), S166–S171
- [10] Li, M., Chen, D., Zhang, S., & Tong, J. (2013). Biomimetic Design of a Stubble-Cutting Disc Using Finite Element Analysis. *Journal of Bionic Engineering*, 10(1), 118–127.
- [11] Sun, J., Wang, Y., Ma, Y., Tong, J., & Zhang, Z. (2018). DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in Engineering Software*, 119(February), 30–37.
- [12] Semarnat, Plan de manejo tipo para armadillo de nueve bandas, 2012.
- [13] Science New Magazine of the society science & the public <https://www.sciencenews.org/article/50-years-ago-armadillos-hinted-dna-wasnt-destiny/> (2018, acceso 22 de Mayo 2019).
- [14] The nine banded armadillo <http://ninebandedarmadillo.weebly.com/digestion.html> (Acceso 10 de Mayo 2019).
- [15] Helwany, S. *Applied Soil Mechanics with Abaqus Applications*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 2007.
- [16] ABAQUS, 2010. ABAQUS User's Manuals Version 6.10.1. ABAQUS Inc, Providence, RI.
- [17] Ibrahim, Ayadi, Bentaher, H., & Maalej, A. (2014). Soil-blade orientation effect on tillage forces determined by 3D finite element models. *Spanish journal of agricultural research*, 12(4), 941–951.