



**Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales**

**TESIS**

**DISEÑOS BIOMIMÉTICOS. UNA ALTERNATIVA PARA REDUCIR LA ADHESIÓN  
SUELO-METAL Y LA DEMANDA DE ENERGÍA DE ÓRGANOS DE REMOCIÓN DE  
SUELO.**

**Ing. Agr. Leonardo VENTURELLI**

**Trabajo de tesis presentado como requisito para optar por el grado académico de  
Magister Scientiae en Mecanización Agraria**

**Director: Dr. Eduardo Alfredo FAVRET**

**Co-Director: Ing. Agr. Mario Omar TESOURO**

**Co-Director: Dr. Telmo PALANCAR**

**2020**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al personal del Instituto de Ingeniería Rural (CIA –INTA)

A Eduardo FAVRET, por su generosidad, su espíritu positivo y por brindarme una idea que logró cautivarme para poder concretar este trabajo.

A Mario Omar TESOURO, por su generosidad y por haber estado siempre que necesité su colaboración

A Telmo PALANCAR, sus aportes fueron muy valiosos

A Guillermo Roberto MARRON, por el empujón al final y la firmeza en resaltar el camino emprendido

A Roberto BALBUENA, su paciencia permitió la finalización de este trabajo

A los jurados: Jorge COSIANSI, Luis Alberto LOZANO y Rafael VILLAREAL, por su tiempo y los aportes que hicieron para mejorar esta tesis.

A mi familia, Paula por el apoyo constante, Elsa por su energía, Julia y Luca, por su curiosidad. A Mauricio quien siempre estuvo espiritualmente presente.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	2
ÍNDICE .....	3
ÍNDICE DE TABLAS .....	4
ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
UNIDADES Y ABREVIATURAS .....	8
RESUMEN .....	9
Palabras claves: labranza, tracción, eficiencia energética .....	9
SUMMARY .....	10
1. INTRODUCCIÓN .....	11
1.1    Métodos geométricos .....	19
Diseño de la superficie .....	19
Minimizar el área de contacto con el suelo .....	20
1.2    Métodos químicos .....	21
Materiales de contacto con el suelo .....	21
1.3    Métodos físicos .....	23
1.4    Diseños biomiméticos .....	24
2. OBJETIVOS .....	31
3. HIPÓTESIS .....	32
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	33
4.1    Ensayo de laboratorio: medición de la fuerza de adhesión normal .....	34
4.2    Ensayo de campo: determinación de la demanda de tracción .....	40
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
5.1    Ensayo de laboratorio: medición de la fuerza de adhesión normal .....	48
5.2    Ensayo de Campo: determinación de la demanda de tracción .....	53
5.3    Relación Tracción – Adhesión .....	60
6. CONSIDERACIONES FINALES .....	67
7. CONCLUSIONES .....	69
8. BIBLIOGRAFÍA .....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Principales datos analíticos y las características externas e internas del perfil del suelo de cada serie.	34
<b>Tabla 2:</b> Caracterización del patrón superficial mecanizado sobre la probeta.	35
<b>Tabla 3:</b> Caracterización del patrón superficial mecanizado sobre la púa. Referencias: Cav) Cavidades; $A_{cav}$ ) Área cavidades ( $mm^2$ ) y $A_p$ ) Área plana de contacto con el suelo de la púa ( $mm^2$ ).	41
<b>Tabla 4:</b> Humedad gravimétrica del suelo y su coeficiente de variación en los cuatro sitios.	44
<b>Tabla 5:</b> Límites de Atterberg del suelo utilizado durante los ensayos.	45
<b>Tabla 6:</b> Densidad aparente del suelo y coeficiente de variación de los sitios utilizados.	45
<b>Tabla 7:</b> Resistencia a la penetración del suelo (IC) y coeficiente de variación (CV) de los sitios utilizados.	46
<b>Tabla 8:</b> Resultado de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey de la adhesión en función de la superficie. Cantidad de datos, adhesión media ajustadas por efecto de la co-variable, intervalos de confianza (95%) y grupos homogéneos según Tukey. Nivel de significación 5%.	48
<b>Tabla 9:</b> Valores de humedad gravimétrica del suelo y de adhesión máxima (kPa) para las dos superficies	51
<b>Tabla 10:</b> Valores medios de la fuerza de tracción, error estándar, intervalos de confianza (95%) y resultado de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey de cada una de las púas evaluadas. Nivel de significación 5%.	53
<b>Tabla 11:</b> Valores medios del coeficiente de labranza (kPa), error estándar, intervalos de confianza (95%) y resultado de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey de cada una de las púas evaluadas. Nivel de significación 5%.	59
<b>Tabla 12:</b> Valores de humedad gravimétrica media (%), adhesión estimada (kPa) y fuerza de tracción media (kgf) en cada uno de los sitios y para cada superficie.	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1:** Gráfico de la de consistencia teórica en función del contenido de humedad del suelo. 13
- Figura 2:** Detalle esquemático del contacto de la herramienta, las partículas de suelo y la interfaz con dos contenidos de agua de suelo. Referencias: a) La adhesión se aproxima a la succión del agua y b) Prevalece la tensión superficial entre aire-agua-interfaz-suelo. Fuente: Ashburner & Sims (1984). 15
- Figura 3:** Modelos de contacto entre las partículas de suelo y la superficie de la herramienta para distintos contenidos hídricos. a) Agua absorbida b) Agua molecular c) Capacidad de campo d) Saturación. 1) Partícula de suelo; 2) Superficie de la herramienta; 3) Interfaz herramienta-suelo; 4) Agua confinada; 5) Menisco de agua; 6) Agua gravitacional. Fuente: Soni & Salokhe, (2006). 16
- Figura 4:** Diagrama de cuerpo libre de una púa donde se observan los componentes de la fuerza de deslizamiento: Referencias:  $\delta$ ) *Ángulo de ataque de la herramienta*;  $A_0$ ) *área de la herramienta inclinada*;  $C_a$ ) *adhesión suelo-metal*;  $V$ ) *Reacción del suelo*;  $D$ ) *Fuerza horizontal*;  $F_0$ ) *Carga normal* y  $k_b$ ) *Resistencia al corte del suelo*. Fuente: Srivastava et al., (1993). 17
- Figura 5:** Detalle esquemático del diseño realizado sobre la superficie de contacto con el suelo de un arado de reja y vertedera. a) Vista del corte; b) Vista superior. Fuente Zhu et al., (1992). 19
- Figura 6:** Diagrama esquemático de una vertedera de arado cuya superficie fue modificada (Qaisrani et al., 1992). 20
- Figura 7:** Detalle de unas vertederas listonadas y de un arado reversible provisto con este tipo de vertederas. Fuente: Lemken (2016). 21
- Figura 8:** a) Detalle del diseño de un arado de reja y vertedera que combina dos estrategias para reducir la adhesión del suelo, por un lado minimizar el área de contacto (vertedera listonada) y por el otro la utilización de materiales plásticos. Fuente: Lemken (2016) <http://www.lemken.com/> b) Detalle de un cuerpo de arado con la vertedera de material plástico. Fuente: Kverneland Group (2015). 23
- Figura 9:** Esquema con la idea integradora del enfoque biomimético de las distintas estrategias para reducir adhesión. Foto: gentileza C. Neinhuis. 26
- Figura 10:** a) Fotografía del insecto de suelo *Diloboderus abderus* (bicho torito, hembra); b) Micrografía SEM de la cutícula del tórax del bicho torito (hembra); c)- Superficie de la púa biomimética con las cavidades semiesféricas. Fotos Eduardo Favret. 27
- Figura 11:** Diagrama esquemático de la superficie ondulada inspirada en los insectos de suelo. Fuente: Tong et al., (1994b). 29
- Figura 12:** Esquema de los sitios donde se realizó el ensayo a campo y se extrajeron las muestras de suelos para el ensayo de adhesión. Referencias: I) Sitio I; II): Sitio II; III) Sitio III y IV) Sitio IV 33

- Figura 13:** a) Planos y b) fotografías de las probetas Lisa y Bio1 utilizadas para medir la adhesión normal contra el suelo. 35
- Figura 14:** Detalle de la secuencia de extracción de muestras sobre las cuales se midió la adhesión normal entre el suelo y el metal. 36
- Figura 15:** Curvas de retención hídrica obtenidas a partir de muestras de suelo inalteradas extraídas del horizonte A. Polinomio de ajuste:  $y = -0,592x^4 + 5,1673x^3 - 14,574x^2 + 6,6015x + 46,566$  ( $R^2 = 0,9988$ ). 38
- Figura 16:** Detalle del instrumento para realizar la medición de la fuerza normal de adhesión entre la superficie metálica y el suelo. Referencias: 1) Hilo tensor; 2) Probeta para realizar la medición; 3) Muestra de suelo; 4) Cilindro metálico de extracción de muestras de suelo. 39
- Figura 17:** Planos de la púa con las principales dimensiones. a) vista frontal b) vista lateral. Escala 1:2. 40
- Figura 18:** a) Vista 3D de la púa. b) Fotografía de las dos púas empleadas en el ensayo. De izquierda a derecha: púa lisa (testigo) y púa biomimética. 41
- Figura 19:** a) Vista frontal del conjunto escarificador de arco rígido y púa. b) Vista lateral del conjunto escarificador de arco rígido y púa. Escala 1:10. 42
- Figura 20:** Detalle del sitio experimental y del dispositivo de captura de datos traccionado por un Tractor New Holland. 43
- Figura 21:** Detalle del perfilómetro utilizado para determinar el área removida luego del laboreo de las púas. 47
- Figura 22:** Adhesión normal (kPa) en función de la humedad gravimétrica (%) del suelo para las dos superficies metálicas: Lisa y Bio1: Referencias: Bio estimado) Valores estimados de la relación estadística entre la adhesión y humedad (%) a través de una función polinómica de tercer grado; Bio observado) Valores observados de adhesión sobre la superficie Bio1; Lisa estimado) Valores estimados de la relación estadística entre la adhesión y humedad (%) a través de una función polinómica de tercer grado; Lisa observado) Valores de adhesión observados de la superficie Lisa. LP) Límite plástico; LL) Límite líquido (Límites de Atterberg). 50
- Figura 23:** Gráfico de la fuerza de tracción en cada uno de los sitios. Cada punto es el promedio de los valores de tracción obtenidos en la serie de datos de tres surcos contiguos. 54
- Figura 24:** Gráfico de interacción de la fuerza de tracción media (kgf) de los distintos tratamientos (púa Lisa y Bio1) en cada uno de los bloques. 55
- Figura 25:** Gráfico de interacción de la fuerza de tracción media (kgf) de los distintos tratamientos (púa Lisa y Bio1) en función de la humedad gravimétrica media del sitio. 56
- Figura 26:** Detalle del perfil de suelo alterado de los distintos diseños de púas 57
- Figura 27:** Proporción de los distintas clases según el tamaño de los agregados del suelo removido por las púas Bio1 y Lisa. Referencias: >19) Agregados mayores a 19 mm; <19->1) Agregados de un tamaño entre 1 y 19 mm; <1) Agregados de un tamaño menor a 1 mm. 58
- Figura 28:** Adhesión normal (kPa) y Fuerza de tracción (kgf) en función de la humedad gravimétrica del suelo para las dos superficies metálicas: Lisa y bio1: Referencias: Adhesión esperada Bio1) Valores estimados de la relación estadística entre la adhesión y humedad

(%) a través de una función polinómica de tercer grado; Adhesión esperada Lisa) Valores estimados de la relación estadística entre la adhesión y humedad (%) a través de una función polinómica de tercer grado; Fuerza de tracción Lisa) Valores observados de la fuerza de tracción a campo; Fuerza de tracción Bio1) Valores observados de la fuerza de tracción con la superficie Bio1. Números romanos corresponden a los sitios. 63

**Figura 29:** a) Fotografía de las cavidades de la púa antes de usarlas en el ensayo. b) Fotografía de las cavidades de la púa luego de utilizarse en el ensayo. c) Fotografía en detalle de la cavidad desgastada con la forma “tipo cometa”. d) Fotografía de microscopía electrónica del detalle de la cavidad en el Bicho Torito. 65

## UNIDADES Y ABREVIATURAS

AASHTO: American Association of State Highway Officials  
Ap: Horizonte superficial antrópico  
Bio1: Superficie biomimética  
Bt<sub>1</sub>: Horizonte de acumulación de arcilla  
Bt<sub>2</sub>: Horizonte de acumulación de arcilla  
BC: Horizonte de transición  
C: Horizonte o capa mineral similar al material original  
°C: Grado Celsius  
CIA: Centro de Investigación en Agroindustria  
cm: Centímetro  
cm<sup>2</sup>: Centímetro cuadrado  
DEM: Método de elementos discretos (*Discrete element method*)  
CV: Coeficiente de variación  
DLC: Diamond like Carbon  
g: gramo  
g cm<sup>-3</sup>: Gramos sobre centímetro cúbico  
ha: Hectárea  
H<sub>0</sub>: Hipótesis nula  
IP: Índice de plasticidad (Atterberg)  
IIR: Instituto de Ingeniería Rural  
INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.  
IRAM: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.  
kg: Kilogramos  
Kgf: Kilogramos fuerza  
km h<sup>-1</sup>: Kilómetros por hora  
kPa: Kilopascales  
kW: Kilowatt  
l ha<sup>-1</sup>: Litros por hectárea  
LL: Límite líquido (Atterberg)  
log<sub>10</sub>: logaritmo en base 10  
LP: Límite plástico (Atterberg)  
mm: Milímetros  
mm<sup>2</sup>: Milímetros cuadrados  
m s<sup>-1</sup>: Metro sobre segundo  
N: Newton  
Pa: Pascal  
pF: logaritmo en base 10 de la altura de la columna de agua en cm  
PTFE: Politetrafluoroetileno  
PES + PTFE: Polietersulfona + politetrafluoroetileno  
SAE: Society of Automotive Engineers  
SEM: Microscopio electrónico de barrido  
SUCS: Sistema Unificado de Casagrande  
USDA: United States Department of Agriculture  
μ: Micrómetro  
Ψm: Potencial mátrico del suelo  
V: Volt



## RESUMEN

### **DISEÑOS BIOMIMÉTICOS. UNA ALTERNATIVA PARA REDUCIR LA ADHESIÓN SUELO-METAL Y LA DEMANDA DE ENERGÍA DE ÓRGANOS DE REMOCIÓN DE SUELO.**

La adhesión del suelo sobre la superficie de los órganos de laboreo representa uno de los principales factores críticos junto a la resistencia al deslizamiento y al desgaste por abrasión. Afecta el rendimiento de numerosas máquinas agrícolas, civiles y de movimiento de suelos, aumentando el consumo de energía con consecuencias negativas sobre los costos de producción y el ambiente. En la historia del diseño de maquinaria agrícola fueron empleadas distintas estrategias para minimizar su impacto, la modificación de la superficie, la reducción del área de contacto, la utilización de distintos materiales y métodos físicos, la lubricación, la electro-ósmosis y el empleo de vibraciones. En los últimos años comenzaron a desarrollarse tecnologías para disminuir la adhesión del suelo sobre los órganos de remoción empleando el enfoque biomimético. La biomimética es definida como una disciplina que engloba el estudio de las propiedades funcionales de los sistemas biológicos para el desarrollo de nuevas tecnologías. A partir de la observación de las características anti-adhesivas de los insectos de suelo, específicamente la cutícula de la cabeza y del tórax del bicho torito hembra (*Diloboderus abderus*) se diseñó una superficie para ser aplicada en órganos que actúen en remoción del suelo. Este trabajo pretende determinar la relación entre dos variables: la fuerza de adhesión normal y la humedad gravimétrica del suelo y por otro lado establecer la influencia sobre la demanda de tracción al modificar la topografía de la superficie metálica. Se realizó un ensayo de laboratorio con el fin de cuantificar la adhesión normal y otro ensayo a campo, utilizando un carro dinamométrico, para determinar la demanda de tracción de una púa con diseño biomimético y una púa lisa. La modificación de la superficie metálica redujo la adhesión normal del suelo sobre el metal y fue influenciada por el valor de humedad del suelo. También se manifestó como una diferencia en la demanda de tracción.

**Palabras claves:** labranza, tracción, eficiencia energética

## SUMMARY

### BIOMIMETIC DESIGN AS AN ALTERNATIVE TO REDUCE SOIL-METAL ADHESION AND ENERGY DEMAND OF SOIL REMOVAL IMPLEMENTS

Soil adhesion to the surface of tools represents one of the main critical factors of tillage performance, together with sliding resistance and abrasion. It affects the performance of numerous agricultural, civil and soil movement machines, increasing energy consumption with negative consequences on production costs and the environment. Different design strategies have been employed to minimize these negative impacts, such as surface modification, contact area reduction, use of different materials and physical methods, such as lubrication, electro-osmosis and vibrations. In the last years, a new design strategy, based on biological systems (biomimetics), began to evolve as an alternative to reduce adhesion in soil tillage tools, by studying biological surfaces with anti-adhesive properties. A surface suitable for soil engaging tools was developed based on the non-adhesive properties of the head and thorax cuticle of the female scarab beetle *Diloboderus abderus*. The aim of this work is to determine the relationship between normal adhesion strength and gravimetric soil moisture and to establish how the traction demand changes when the topography of the metal surface is modified using a biomimetic design. In order to compare the draft force between a shovel with a biomimetic design and one with a smooth design, normal adhesion was quantified both in a laboratory and field tests. It was found that the biomimetic design reduced the normal adhesion of the soil to the metal, and this result depended on the soil moisture value. It was also verified that the biomimetic design needs a smaller draft force requirement.

**Key words:** tillage, draft force, energy efficiency.

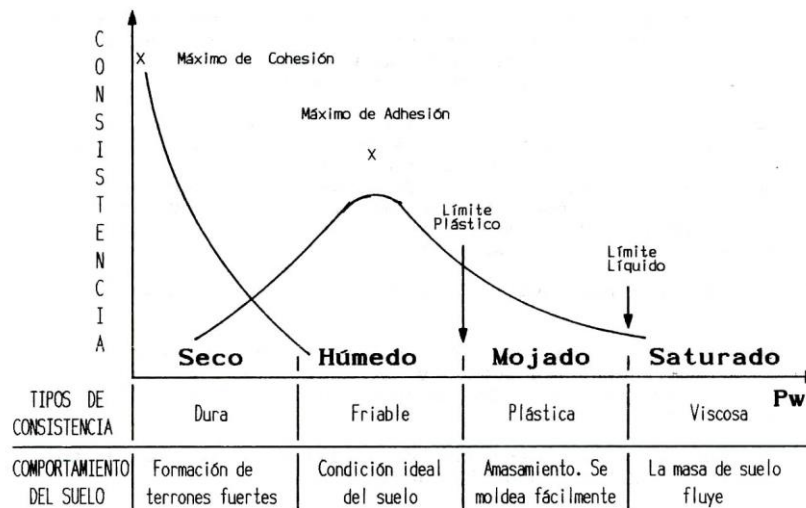
## 1. INTRODUCCIÓN

La adhesión del suelo sobre la superficie de los órganos de laboreo representa uno de los principales factores críticos junto a la resistencia al deslizamiento y el desgaste por abrasión (Ren et al., 2006). Afecta el rendimiento de numerosas máquinas agrícolas, civiles y de movimiento de suelos, aumentando el consumo de energía con consecuencias negativas sobre los costos de producción y el ambiente. En equipos de labranza, la adhesión afecta la calidad del trabajo y la energía consumida. En sembradoras, la adhesión actúa sobre órganos como el abresurco y el cubresurco y provoca una disminución en la tasa de emergencia de semillas. La calidad de la fertilización y el transplante también decrecen con la adhesión del suelo (Ren et al., 2001). La cosecha de plantas con órganos subterráneos comestibles puede ser perjudicada por este fenómeno (Vermeulen et al., 1997). La adhesión del suelo sobre las máquinas excavadoras, especialmente cuando es alto el contenido de arcilla, provoca una disminución de la eficiencia y de la precisión del trabajo debido a que cambian las propiedades del suelo (distribución del tamaño de los agregados, contenido de agua y relación de vacíos) y las propiedades del material metálico (rugosidad de la superficie y mojabilidad) (Satomi et al., 2012).

Se estima que la energía utilizada para superar la adhesión y la fricción entre el suelo y la superficie de las herramientas de labranza se encuentra entre el 30% y el 50% de la energía bruta que consume la producción agrícola (Qian & Zhang, 1984; Vinogradov & Podskrebko, 1962). La resistencia al deslizamiento entre el suelo y la superficie de un arado durante la labranza constituye entre el 25% y 28% del total (Guo & Liu, 1995). En máquinas de movimiento de suelo, como palas excavadoras, retroexcavadoras y camiones de carga autodescargables queda entre un 30% y 50% de suelo remanente debido a la adhesión. Asimismo, una adhesión excesiva incrementa la resistencia a la rodadura en vehículos sobre terrenos inundables como en el cultivo de arroz (Ren et al., 2001).

La adhesión es definida por algunos autores como la capacidad entre dos cuerpos en contacto para resistir la fuerza de tracción después de haber sido presionados juntos (Tong et al., 1994a). También, la definen como la fuerza de atracción entre las partículas y el agua (Hendrick & Bailey, 1982). Según Ashburner & Sims (1984), la adhesión representa las fuerzas de atracción que se desarrollan entre el suelo y la interfaz y que tienden a evitar el deslizamiento entre ellos. La interfaz es normalmente suelo/metal, pero es conveniente hablar en términos de suelo-interfaz ya que pueden existir otros materiales como madera o plástico.

En 1911 Atterberg dividió el rango cohesivo del suelo desde el estado sólido al líquido en cinco subestados (líquido, semilíquido, plástico, semisólido y sólido). Los límites de Atterberg son límites arbitrarios para estas divisiones en términos de contenido de agua, los principales son el límite plástico (LP), el líquido (LL) y el de contracción (Figura 1). El índice de plasticidad (IP) es definido como la diferencia entre el LL y el LP. También se incluyó el límite de pegajosidad que es definido como la cantidad mínima de humedad a la cual el suelo empieza a adherirse a las herramientas metálicas (Terzagui & Peck, 1958). Estos hallazgos fueron de suma utilidad para los estudios de consistencia del suelo, que es una propiedad mecánica que mide la respuesta de éste a la deformación y ruptura por fuerzas externas. Se debe a la cohesión, que es la fuerza de atracción entre partículas de la misma naturaleza la cual está gobernada por las fuerzas intermoleculares, como las fuerzas de Van der Waals, atracción electrostática, puentes catiónicos, el efecto aglutinante de la materia orgánica y los óxidos de hierro y a la adhesión que, como se mencionó en párrafos anteriores, es la molécula de agua la que juega un papel preponderante.



**Figura 1:** Gráfico de la de consistencia teórica en función del contenido de humedad del suelo.

Fontaine (1954) define a la adhesión del suelo como una fuerza (gf) por unidad de área (cm<sup>2</sup>) causada por una película de agua. Demostró que la película de agua juega un rol importante en la adhesión del suelo. Cuando se forma esta película continua entre el suelo saturado y la superficie sólida y se alcanza un equilibrio, la tensión de agua es la misma que la masa de suelo, incluyendo el contacto con la interfaz. El mismo autor manifiesta que la adhesión es muy fuerte cuando la película de agua es muy fina y viceversa. En esta condición las formas de todos los meniscos responden a la ecuación de Young Laplace (Ecuación 1). La fuerza de adhesión normal por unidad de área de la película de agua es igual a la tensión del agua.

$$P = \frac{2Y_{LV}}{R_t} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

*P*: Presión capilar (g cm<sup>-2</sup>)

*Y<sub>LV</sub>*: Tensión superficial (g cm<sup>-1</sup>)

*R<sub>t</sub>*: Radio del menisco (cm)

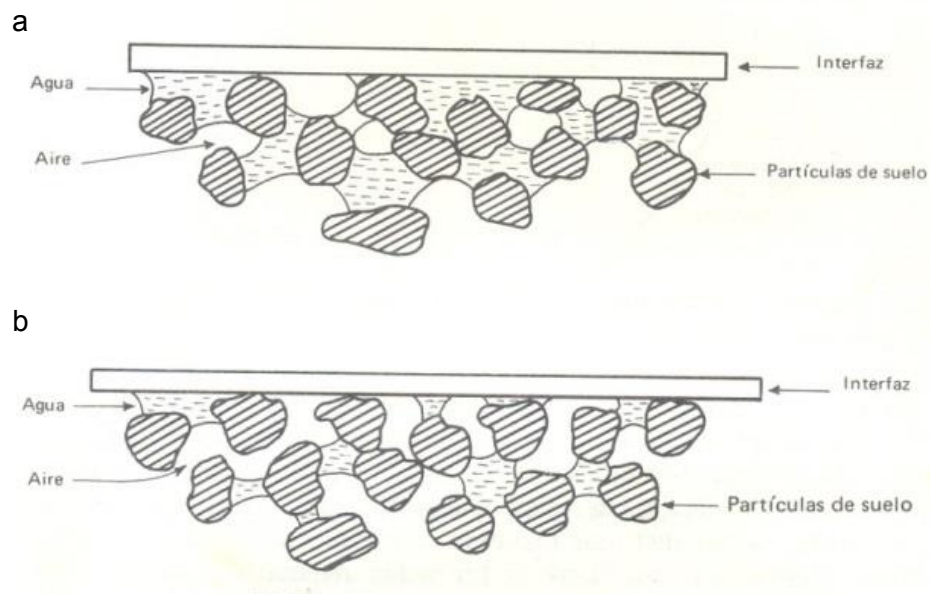
La fuerza de adhesión se debe a la tensión superficial del agua y consecuentemente depende de su valor y del contenido de humedad (Srivastava et al., 1993). La adhesión normal puede ser tratada como una acción similar al sometimiento de una carga normal en la interfaz (Fountaine, 1954; Gill & Vanden Berg, 1968). La cohesión y la adhesión son fenómenos moleculares que ocurren en la interfaz de un líquido y un gas y son el resultado de interacciones eléctricas de las partículas microscópicas sólidas (Soni & Salokhe, 2006).

Gill & Vanden Berg (1968) identificaron dos modos principales de influencia de la adhesión del suelo: la fricción por deslizamiento y la pegajosidad. Hendrick & Bailey (1982) reportaron que la resistencia al deslizamiento entre el suelo y una herramienta está compuesta por dos componentes, el friccional y el adhesivo. El componente friccional comprende las fuerzas de “cizalla”, “rozamiento” y “corte” de las partículas abrasivas, el disturbio y la deformación del suelo. En cambio, el componente adhesivo comprende la resistencia tangencial viscosa de la película de agua.

Resulta dificultoso delimitar claramente los componentes adhesivos y de fricción del total de las fuerzas y se necesita un enfoque simultáneo (Soni & Salokhe, 2006). En este sentido, Srivastava et al., (1993), manifiestan que en aplicaciones mecánicas resulta virtualmente imposible diferenciar fricción de adhesión. La fricción representa la fuerza de rozamiento en la interfaz y depende del grado de pulido de su material y de la rugosidad de las partículas del suelo. La mayor parte de las herramientas de labranza trabaja por deslizamiento por el suelo, y de allí que el esfuerzo y la fuerza de deslizamiento en la interfaz suelo/metal sea de una importancia fundamental al estar la mayoría de estas herramientas fabricada con metales.

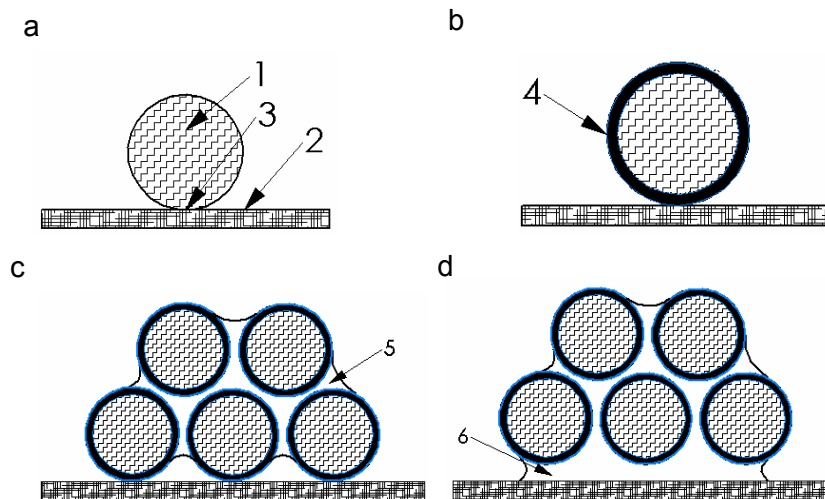
Ashburner & Sims (1984), reportan que la adhesión suelo-interfaz representa las fuerzas de atracción generadas principalmente por la presencia de agua en el suelo. Con un

elevado contenido hídrico, el agua genera una succión dentro de la estructura del suelo, que atrae a la interfaz. En cambio, con un bajo contenido hídrico, el espacio poroso del suelo de la interfaz contiene más aire y el agua es retenida con mayor tenacidad por fuerzas capilares y de adsorción (Figura 2).



**Figura 2:** Detalle esquemático del contacto de la herramienta, las partículas de suelo y la interfaz con dos contenidos de agua de suelo. Referencias: a) La adhesión se aproxima a la succión del agua y b) Prevalece la tensión superficial entre aire-agua-interfaz-suelo. Fuente: Ashburner & Sims (1984).

La Figura 3 muestra los diferentes modelos de contacto entre las partículas del suelo y la superficie de la herramienta para distintos contenidos de agua en el suelo.



**Figura 3:** Modelos de contacto entre las partículas de suelo y la superficie de la herramienta para distintos contenidos hídricos. a) Agua absorbida b) Agua molecular c) Capacidad de campo d) Saturación. 1) Partícula de suelo; 2) Superficie de la herramienta; 3) Interfaz herramienta-suelo; 4) Agua confinada; 5) Menisco de agua; 6) Agua gravitacional. Fuente: Soni & Salokhe, (2006).

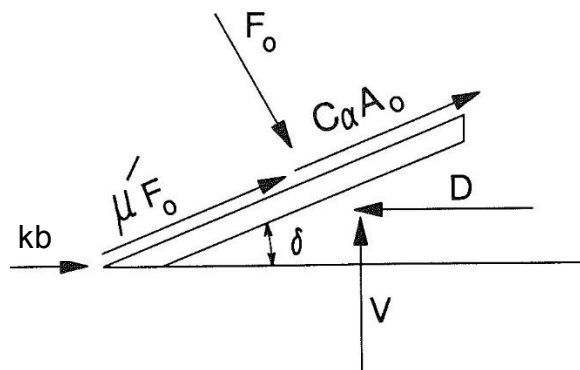
La adhesión es un fenómeno complejo ya que involucra aspectos del suelo, del material de contacto y del agua. Los parámetros que afectan la adhesión del suelo son textura, humedad, tensión del agua del suelo, porosidad y contenido de materia orgánica, entre otros (Chancellor, 1994). La adhesión del suelo aumenta cuando se incrementa el contenido de arcilla y es más alta cuando la humedad se encuentra entre el límite plástico y el límite líquido (Ren et al., 2001). Zeng (1995) afirmó que la adhesión del suelo a la herramienta aumenta con la tensión del agua. La adhesión se incrementa cuando aumenta la viscosidad del líquido (Ren et al., 2001). Según Azadegan & Massah, (2012) la temperatura del suelo influye sobre la adhesión. Con un incremento térmico desde 5°C hasta 30°C, los autores encontraron que la adhesión suelo-metal disminuyó un 82%. Fukagawa et al., (2002) investigaron la relación entre la adhesión y la relación de vacíos. Informaron que cuando aumenta esta relación de vacíos disminuye la adhesión. Li et al., (1993a, 1993b y 1996) revelaron que la microestructura de los materiales sólidos también afecta la adhesión. Encontraron incrementos en este parámetro del orden del 23 % al



modificar la temperatura de 200 a 400 ° C durante el tratamiento superficial de templado en acero SAE 1035.

Las fuerzas que actúan sobre una herramienta de remoción del suelo pueden ser ampliamente clasificadas en macro y microscópicas. Las primeras dependen de los parámetros del sistema, incluyendo el tipo de herramienta, su velocidad, las propiedades del suelo y la profundidad de trabajo. Las fuerzas microscópicas dependen en gran medida de las propiedades intrínsecas de la superficie de la herramienta, la composición del suelo, las propiedades físicas y químicas del suelo y de los fenómenos moleculares.

Srivastava et al., (1993) representan el diagrama de cuerpo libre con las fuerzas que actúan sobre una herramienta de labranza en dos dimensiones (Figura 4: **Dia**). El vector que representa la adhesión es  $C_a$  y es afectado por la superficie de la herramienta ( $A_o$ ). El vector de la componente friccional ( $\mu'$ ) tiene la misma dirección y sentido que el adhesivo y es proporcional a la carga normal ( $F_o$ ).



**Figura 4:** Diagrama de cuerpo libre de una púa donde se observan los componentes de la fuerza de deslizamiento: Referencias:  $\delta$ ) Ángulo de ataque de la herramienta;  $A_o$ ) área de la herramienta inclinada;  $C_a$ ) adhesión suelo-metal;  $V$ ) Reacción del suelo;  $D$ ) Fuerza horizontal;  $F_o$ ) Carga normal y  $kb$ ) Resistencia al corte del suelo. Fuente: Srivastava et al., (1993).

La relación suelo-interfaz puede ser estudiada a través del movimiento de un patín, sobre el cual se va aplicando incrementalmente una carga normal y midiendo la fuerza

necesaria para provocar su deslizamiento sobre el suelo. Puede observarse a través de la ecuación de Coulomb su equivalencia sobre los parámetros de adhesión (primer término) y fricción (segundo término).

$$F_d = C_\alpha + \sigma \tan \delta \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde:

$F_d$ : Esfuerzo máximo de deslizamiento (N)

$C_\alpha$ : Adhesión (N)

$\sigma$  : Carga normal (N)

$\delta$ : Ángulo de fricción suelo/metal (°)

Gill & Vanden Berg (1968) reportaron que cuando el suelo se adhiere a la superficie de la herramienta, éste comienza a deslizarse sobre otra capa de suelo, incrementando la fricción, ya que se reemplaza la fricción metal-suelo por la fricción suelo-suelo, que es más elevada. En este sentido Tong et al., (2009) reporta para un suelo de textura arcillosa valores de 23° para el ángulo de fricción suelo-metal y de 34° el de la fricción suelo-suelo. Hendrick & Bailey (1982) expresaron que en la interfaz la resistencia al deslizamiento depende de la adherencia, la tensión normal y el ángulo de fricción entre el suelo y la interfaz. Al reducir la adhesión y el ángulo de fricción de la interfaz a valores menores que la cohesión del suelo y el ángulo de fricción suelo-suelo, respectivamente, la resistencia al deslizamiento de los implementos al suelo se reduce.

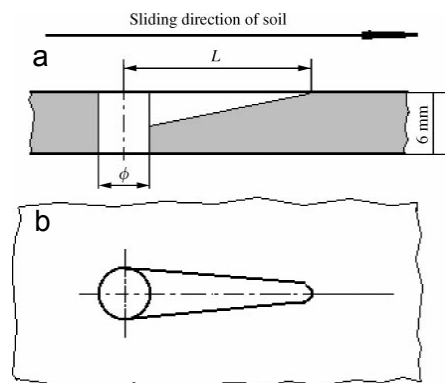
A lo largo de la historia de la mecanización se reconocen diversas estrategias para reducir el componente de la adhesión del suelo sobre los órganos de remoción. Pueden agruparse, según los principios involucrados, en métodos geométricos, químicos y físicos. Los geométricos están referidos al diseño de la superficie de contacto con el suelo. Los químicos, básicamente se refieren al material empleado, e incluyen también los

recubrimientos superficiales. El empleo de vibraciones, campo magnético, electro-ósmosis y lubricación comprenden los métodos físicos.

## 1.1 Métodos geométricos

### Diseño de la superficie

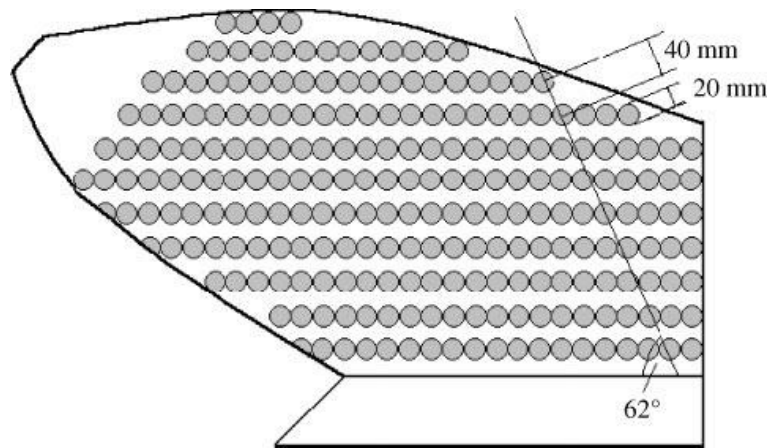
Uno de los métodos para reducir la adhesión y la fricción es modificar el diseño de la superficie de los implementos. Por ejemplo, a través de la realización de ondulaciones convexas sobre la superficie de contacto del arado con el suelo se puede reducir el área de contacto real y romper la continuidad de la película de agua entre el suelo y las superficies sólidas, lo que resulta en una reducción de la adherencia del suelo y la resistencia al deslizamiento (Cong et al., 1990). Zhu et al., (1992) modificaron la superficie de un arado, practicando un agujero pasante con un fresado lateral en rampa, formando una geometría “tipo cometa” como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5:** Detalle esquemático del diseño realizado sobre la superficie de contacto con el suelo de un arado de reja y vertedera. a) Vista del corte; b) Vista superior. Fuente Zhu et al., (1992).

Qaisrani et al., (1992) dispusieron sobre la superficie de la vertedera de un arado, protuberancias de 20 mm de diámetro, alineadas a  $62^\circ$  respecto a la horizontal. Esta disposición responde a lo informado por Suminitrado et al., (1988) que reportaron que la dirección del flujo de circulación del suelo sobre el plano de una vertedera forma un ángulo entre  $55^\circ$  y  $65^\circ$  (Figura 6). Ellos encontraron una reducción en la tracción respecto a

vertederas lisas entre el 24 y 30 %, con una velocidad de desplazamiento de 3,6 y 5,0 km h<sup>-1</sup>, respectivamente.



**Figura 6:** Diagrama esquemático de una vertedera de arado cuya superficie fue modificada (Qaisrani et al., 1992).

### **Minimizar el área de contacto con el suelo**

En arados, el uso de vertederas listonadas es una de las opciones para minimizar el área de contacto y el componente de la fuerza de arrastre (Figura 7). De esta manera disminuye la componente adhesiva, que tendrá más impacto en suelos pesados y plásticos (Ashburner & Sims, 1984).



**Figura 7:** Detalle de unas vertederas listonadas y de un arado reversible provisto con este tipo de vertederas. Fuente: Lemken (2016).

## 1.2 Métodos químicos

### Materiales de contacto con el suelo

La modificación de los materiales de los implementos es un método para reducir la adhesión del suelo y la fricción en la interfaz. Existen investigaciones que han examinado la baja adhesión del suelo de los materiales polímeros, y fue explicada debido a su baja energía superficial. La energía superficial es definida como la suma de todas las fuerzas intermoleculares que se encuentran en la superficie de un material, es decir el grado de atracción o repulsión que un material ejerce sobre el otro. Los polímeros probados incluyen PTFE (teflón), polietileno de ultra alta densidad y PTFE + PES. La aplicación de polímeros en implementos de laboreo de suelo está limitada por la baja resistencia a la abrasión. Gill & Vanden Berg (1968) indicaron que una lámina de PTFE de 5 mm de espesor puede reducir la fuerza de arrastre de un arado de vertedera hasta un 25% respecto a un arado convencional en un suelo adhesivo, pero en un suelo relativamente abrasivo se desgasta la

lámina al cabo de unas 20 ha, mientras que una lámina de polietileno se desgasta en unas 8 ha (Ashburner & Sims, 1984). La utilización de materiales no mojables, genera una reducción en el valor de la tensión superficial y disminuye el valor de la fuerza de adhesión entre el suelo y su interfaz.

La utilización de esmaltes y recubrimientos superficiales es otra alternativa química que permite reducir la adhesión. El empleo de una capa de esmalte sobre la superficie de contacto redujo la adhesión del suelo (Salokhe & Gee Clough 1988; 1989; Salokhe et al., 1990; 1993). Horner (2011) del Instituto de Mecánica de los Materiales de Fraunhofer (Alemania) ha encontrado que la fricción entre el suelo y la herramienta se reduce a la mitad en un arado recubierto con DLC (*Diamond Like Carbon*), lo que provocó una reducción en la potencia requerida por el tractor en un 30%. Además de reducir la fricción, los recubrimientos con DLC proporcionan resistencia a la corrosión y al desgaste mejorando notablemente la durabilidad de los implementos (De Guire, 2011).

En Europa, en donde la utilización del arado de reja y vertedera continúa en vigencia plena, existen innovaciones que incorporan la combinación de materiales, plásticos y aceros. Es el caso del modelo "*Duramaxx Plough*" de la marca Lemken de Alemania, donde su diseño evidencia la propuesta del alistamiento de la vertedera (disminución del área de contacto) y además incorpora un material plástico con propiedades antiadhesivas (Figura 8a). Este modelo es recomendado para suelos extremadamente arcillosos o en condiciones de suelo que generen poca presión sobre la vertedera (DuraMaxx, 2014). En Noruega, la empresa de maquinaria agrícola Kverneland, promociona una vertedera de material plástico con propiedades antiadhesivas para ser utilizadas en suelos orgánicos donde la adhesión a los implementos resulta un problema agudo (Figura 8b) (Kverneland Group, 2015).

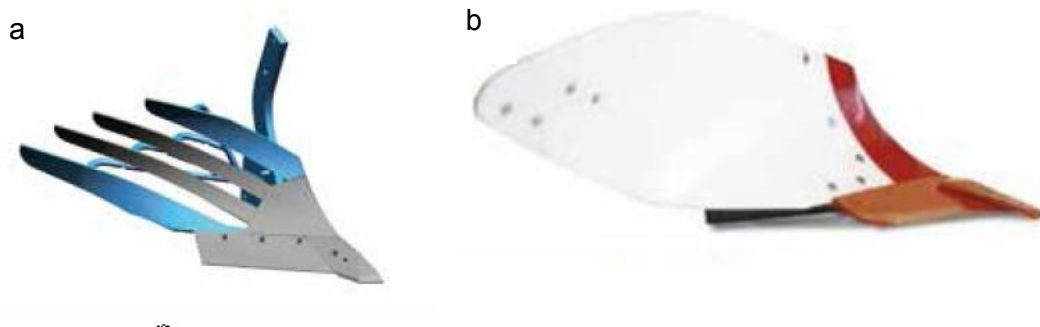


Figura 8: a) Detalle del diseño de un arado de reja y vertedera que combina dos estrategias para reducir la adhesión del suelo, por un lado minimizar el área de contacto (vertedera listonada) y por el otro la utilización de materiales plásticos. Fuente: Lemken (2016) <http://www.lemken.com/> b) Detalle de un cuerpo de arado con la vertedera de material plástico. Fuente: Kverneland Group (2015).

Tong et al., (1994a), evaluaron un arado de reja y vertedera sobre un canal edafométrico. Encontraron una reducción en el valor de adhesión del orden del 88 %, 43 % y 26 %, con los materiales, PES-PTFE, recubrimiento con epoxy y esmalte, respectivamente. Esta reducción en la adhesión repercutió significativamente en la fuerza de tracción de cada reja respecto al testigo sin recubrimiento, ya que la magnitud de la disminución fue del orden de 11,0 %, 10,3 % y 8,2 % correspondiente a la reja de PES-PTFE, epoxy y con esmalte, respectivamente.

### 1.3 Métodos físicos

Los métodos físicos para reducir la adhesión entre el suelo y los órganos de laboreo son la electro-ósmosis, la magnetización, el empleo de vibraciones y la lubricación. El principio de electro-ósmosis consiste en atraer las moléculas de agua hacia la superficie de la herramienta de laboreo por medio de una corriente eléctrica. Para ello el suelo debe tener buena permeabilidad y es necesario crear un potencial eléctrico de 100 V para atraer el agua a la interfaz (Ashburner & Sims, 1984).

Tong et al., (2000) estudiaron el efecto del campo magnético sobre la resistencia del arado. Emplearon rejas de arado con campo magnético permanente en su parte posterior y

lograron reducir la resistencia del arado y el consumo de combustible del tractor en el orden del 13 % respecto a un arado sin magnetización (Han & Zhang, 1991; Guo & Liu, 1995).

La posibilidad de reducir la fuerza de arrastre por medio de vibración ha sido estudiada por más de un siglo, especialmente en herramientas con alto requerimiento de fuerza como subsoladores y máquinas de drenaje. En suelos arenosos aparentemente la vibración disminuye la reacción suelo interfaz y quizás también la reacción entre partículas y agregados del suelo, reduciendo el componente de resistencia debido a la fricción. (Ashburner & Sims, 1984).

Existen antecedentes de desarrollos tecnológicos que experimentaron lubricar la interfaz entre el implemento y el suelo. Se realizaron pruebas con un arado de reja y vertedera, utilizando agua y una solución de agua con 3 % de un polímero como lubricante de la superficie de contacto suelo-implemento. Los ensayos indicaron la posibilidad de reducir la fuerza de arrastre entre el 15 % y 25 % con la aplicación de 40 y 100 l ha<sup>-1</sup> de la solución lubricante respecto a un testigo sin lubricar (Ashburner & Sims, 1984).

#### **1.4 Diseños biomiméticos**

La biomimética es definida como una disciplina que engloba el estudio de las propiedades funcionales de los sistemas biológicos para el desarrollo de nuevas tecnologías (Favret, 2008). A través del riguroso proceso de selección de la evolución, los organismos vivos van desarrollando exitosamente habilidades sobresalientes para adaptarse a su entorno (Ren, 2009). Varias innovaciones tecnológicas surgieron a partir de esta técnica como el cierre autoadherente marca Velcro® patentado por el suizo George de Mestral en 1950. Su desarrollo se inspiró al analizar la adherencia del abrojo del cardo sobre el pelaje de un perro. En la misma época el estadounidense Jack Steel y el alemán Otto Schmitt, establecieron los conceptos de Biónica y Biomimetismo, respectivamente (Bhushan, 2009; Bar-Cohen, 2006). Con el objetivo de reducir el consumo de combustible y la emisión de

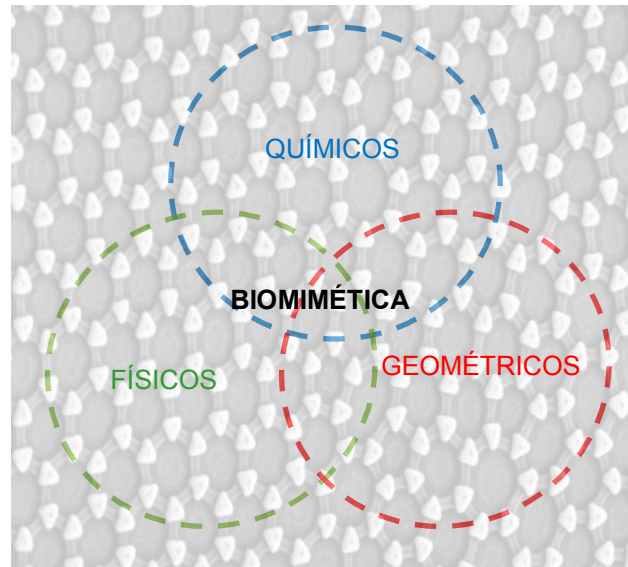


gases la empresa Mercedes Benz estudió el diseño hidrodinámico del pez caja (*Ostracion cubicus*) para crear un nuevo automóvil monovolumen (*Concept car*) en donde encontraron coeficientes aerodinámicos de excelencia. En el año 1998 Barthlott registró una patente con el llamado “efecto loto” estudiado en la hoja de loto (*Nelumbo nucifera*) que tiene la característica de presentar una superficie super-hidrofóbica, por la estructura jerárquica que presenta, la cual provee la formación de intersticios de aire, que le permiten reducir el área de contacto, por consecuencia la adherencia y ser autolimpiante (Barthlott, 1998). Siguiendo esta línea, la empresa española Beissier, especializada en revestimientos para la construcción, desarrolló una pintura comercial conocida como pintura Lotusan, con la característica de que la suciedad ambiental no se adhiere sobre la superficie y el agua de lluvia no la humedece.

A partir de la observación de las características antiadhesivas de los insectos del suelo, fueron estudiados los principios utilizados y su potencial de aplicación en órganos de remoción y maquinas que trabajan en contacto con el suelo. Estos insectos poseen la particularidad de que pueden moverse sobre el suelo sin que éste se les adhiera, principalmente en suelos arcillosos.

El enfoque biomimético permite conocer las propiedades de los materiales, las formas desarrolladas y los mecanismos involucrados en la naturaleza y así integrar los factores geométricos, químicos y físicos (Figura 9), que fueron mencionados con anterioridad, con el fin de reducir la adhesión y la fricción de implementos de suelo y mejorar la resistencia al deslizamiento. Luego del estudio de los materiales y para poder fabricar estas superficies tecnológicas existen numerosos procesos modernos como litografía, plasma y electrodeposición (Sun et al., 2005; Pozzato et al., 2006). Estas micro-topografías pueden mecanizarse sobre materiales a través de métodos interferométricos con láseres de

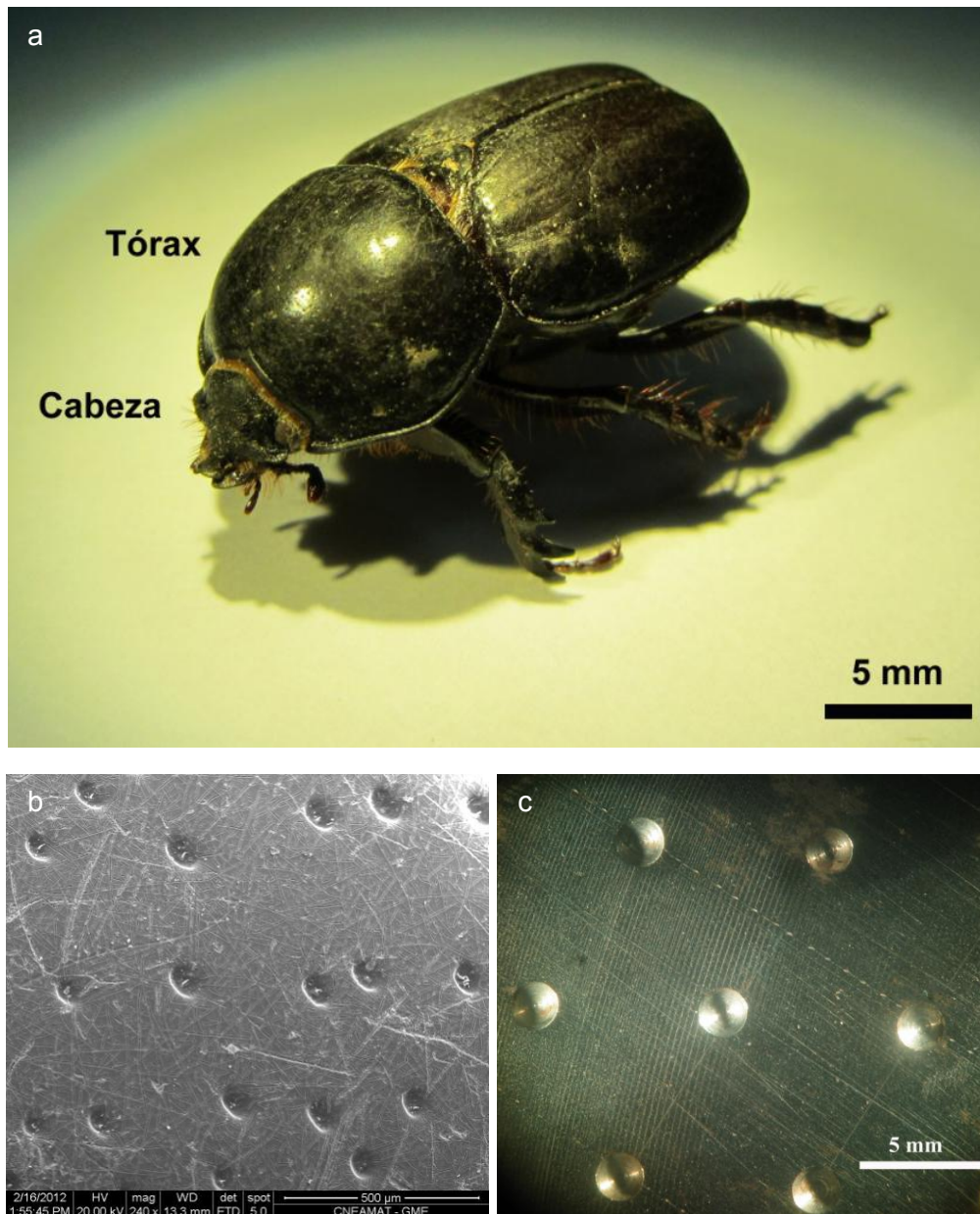
alta potencia y son útiles para “grabar” patrones periódicos de variadas dimensiones en la superficie del material.



**Figura 9:** Esquema con la idea integradora del enfoque biomimético de las distintas estrategias para reducir adhesión. Foto: gentileza C. Neinhuis.

Favret (2014) comenzó a estudiar las características principales de la topografía de la cabeza y del tórax del bicho torito hembra (*Diloboderus abderus*) para luego establecer criterios de diseño de la superficie de una púa de un escarificador. Posteriormente se encontró que existía un rango preferencial de distancias entre las cavidades, de aproximadamente  $250 \pm 5 \mu$  en el tórax y de  $150 \pm 5 \mu$  en la cabeza. Las cavidades tienen diámetros de  $50 \pm 5 \mu$  (Tesouro et al., 2018). Teniendo en cuenta la disponibilidad de máquinas y herramientas, fue elegido un diámetro de 2 mm para mecanizar las cavidades en la superficie de la púa. Luego se calculó un factor de escala a través del cociente entre el diámetro de las cavidades a mecanizar (2 mm) y el del bicho toro ( $50 \mu = 0,05$  mm). El factor hallado fue de 40. Para definir la distancia entre las cavidades de la púa, se afectó la distancia encontrada en el tórax ( $250 \mu = 0,25$  mm) por este factor, quedando definida la distancia entre las cavidades de la púa en 10 mm ( $40 \times 0,25$  mm). A partir de los análisis

obtenidos se diseñó la superficie de la púa biomimética (Bio1) con una distribución de un triángulo equilátero, con las cavidades semiesféricas dispuestas en sus vértices. Estos triángulos forman un hexágono que es una estructura que se repite en la naturaleza (Tesouro et al., 2018) (Figura 10).



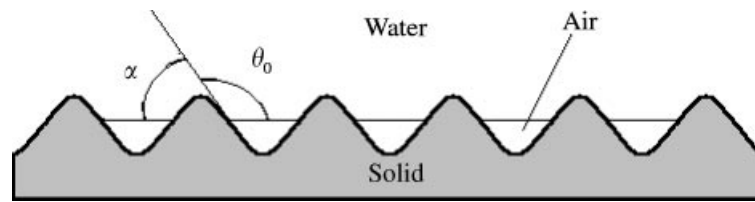
**Figura 10:** a) Fotografía del insecto de suelo *Diloboderus abderus* (bicho torito, hembra); b) Micrografía SEM de la cutícula del tórax del bicho torito (hembra); c)- Superficie de la púa biomimética con las cavidades semiesféricas. Fotos Eduardo Favret.

Como continuidad del trabajo mencionado en el párrafo precedente, Canzian et al., (2014) patentaron un diseño de topografía superficial para aplicaciones agrícolas en herramientas con interacción con el suelo, que es la superficie que se evalúa en esta tesis. Tasovski (2009) de la firma Caterpillar patentó un diseño similar, pero en vez de cavidades utiliza protuberancias sobre la superficie de contacto con el suelo para ser empleada en máquinas de transporte y movimiento de suelos.

Ren et al., (2006) analizaron la variación de la fuerza de tracción de diferentes diseños de superficies biomiméticas sobre palas excavadoras experimentales en un canal edafométrico. Encontraron que los factores que afectan la resistencia al deslizamiento de las palas son el número de formas convexas, el diámetro de su base, su distribución y su altura. Concluyeron que puede reducirse la fuerza de tracción mediante el empleo de superficies rugosas.

Satomi et al., (2012) analizaron la relación entre la superficie, la mojabilidad y la adhesión del suelo empleando materiales metálicos con tres rugosidades superficiales y una superficie generada con la cutícula de un insecto del suelo. El valor más bajo de adhesión lo hallaron con la superficie del insecto. Tong et al., (2015), compararon el efecto de la variación de la topografía superficial en dos ruedas contactadoras de semilla, una con superficie lisa y la otra con diseño biomimético. Encontraron en esta última una disminución en la resistencia a la rodadura, una mejor conservación de la humedad del suelo y un incremento en la tasa de germinación.

Ren et al., (1990), Tong et al., (1994b) y Jia et al., (1995, 1996) analizaron los efectos de la micro-topografía de la cutícula de los animales del suelo sobre su comportamiento de humectación. Ellos concluyeron que a través de esas cavidades aumentaba su hidrofobicidad y determinaron una influencia del ángulo de inclinación que permitía el ingreso de aire en los canales, formando una interfaz compuesta (Figura 11).



**Figura 11:** Diagrama esquemático de la superficie ondulada inspirada en los insectos de suelo. Fuente: Tong et al., (1994b).

Sun et al., (2018) informan que la tecnología con inspiración biomimética fue aplicada en equipamiento agrícola, debido a que las estructuras biomiméticas poseen la habilidad de reducir la adhesión y la fricción con el suelo. Ellos se encargaron de evaluar a través de un modelo de simulación DEM el requerimiento energético y el impacto sobre la remoción de suelo de un escarificador de arco rígido con distintos diseños biomiméticos inspirados a partir de la micromorfología de la piel de tiburón.

Hasta el momento se advierte que el estudio de superficies halladas en distintos campos de la naturaleza, como el de los insectos del suelo, puede inspirar el diseño de tecnologías con el fin de solucionar problemas o aumentar la eficiencia en distintos procesos productivos. El caso de la púa escarificadora diseñada por Favret, inspirada a partir de la cutícula del bicho torito es uno de ellos. En aplicaciones agrícolas aún no se detectan productos tecnológicos que surjan a partir de la biomimética y gran parte de los desarrollos se encuentran aún en etapas de investigación. No obstante, representa un área que registra varias patentes en la actualidad.

En términos generales los resultados descriptos anteriormente fueron realizados a escala de laboratorio, empleando canales edafométricos. Qaisrani et al., (1993), remarcó la importancia de realizar este tipo de estudio en condiciones reales a campo. En la presente tesis se realiza una evaluación en laboratorio y a campo de un diseño biomimético de

órganos para remoción de suelo tratando de comprender los mecanismos involucrados y obtener resultados en condiciones reales de campo.

En un contexto de calentamiento global, los esfuerzos dedicados a mejorar la eficiencia energética de productos y procesos cada vez cobran mayor importancia. Existe en la agroindustria una mayor exigencia de producir materias primas y alimentos con mejores indicadores ambientales, y el energético es uno de los más significativos. El incremento del consumo de energía produce un efecto adverso en varios aspectos, particularmente en la emisión de CO<sub>2</sub>. Actualmente, la agricultura ha sido señalada como la responsable del 25 % de la emisión de los gases de efecto invernadero respecto a otras actividades humanas (Smith et al., 2014). El enfoque biomimético, a través del estudio de las propiedades funcionales desarrolladas en la naturaleza, se presenta como una alternativa para desarrollar innovaciones en la dirección planteada.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Mejorar la eficiencia energética de órganos de remoción de suelo, a través de la incorporación de cavidades semiesféricas en la superficie de contacto, mediante un diseño biomimético.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Conocer el efecto de la incorporación de cavidades semiesféricas en la superficie de contacto con el suelo sobre la fuerza de adhesión normal en función de la humedad gravimétrica.

Determinar el efecto sobre la demanda de tracción de la incorporación de cavidades semiesféricas en la superficie de contacto con el suelo de una púa de un escarificador de arco rígido.

### **3. HIPÓTESIS**

La incorporación de cavidades semiesféricas, en la superficie de contacto con el suelo, reduce la adhesión normal del suelo sobre el metal y está influenciada por la humedad gravimétrica.

La incorporación de cavidades semiesféricas, en la superficie de contacto de la púa de un escarificador de arco rígido reduce la fuerza de tracción.



#### 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para comprobar las hipótesis y evaluar los objetivos específicos fueron realizados dos ensayos. El primero en el laboratorio, donde se determinó la fuerza de adhesión normal del suelo sobre una probeta con textura lisa y otra con superficie biomimética (denominada Bio1). El segundo ensayo se realizó a campo, con el fin de determinar la demanda de tracción de un escarificador de arco rígido provisto con una púa lisa y con una púa con superficie biomimética.

El ensayo a campo y la extracción de las muestras para el ensayo en laboratorio se realizaron en las parcelas experimentales del Instituto de Ingeniería Rural (IIR-CIA INTA), ( $34^{\circ}36'24,93$  Sur –  $58^{\circ}39'18,17$  Oeste) ubicado en la localidad de Hurlingham (Figura 12).



**Figura 12:** Esquema de los sitios donde se realizó el ensayo a campo y se extrajeron las muestras de suelos para el ensayo de adhesión. Referencias: I) Sitio I; II) Sitio II; III) Sitio III y IV) Sitio IV

El suelo es de la serie Hurlingham y pertenece al gran grupo de los Argiudoles Vérticos (Gomez, 1993). Los principales datos analíticos y las características externas e internas del perfil del suelo se observan en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Principales datos analíticos y las características externas e internas del perfil del suelo.

<b>Horizonte</b>	Ap (0-16 cm) Bt <sub>1</sub> (16-72 cm) Bt <sub>2</sub> (72-105 cm) BC (105-118 cm) C (118-130 cm)	
<b>Textura</b>	<b>Ap</b>	<b>Bt<sub>1</sub></b>
<b>Arcilla (%)</b>	23,6	57,2
<b>Limo (%)</b>	51.4	23.9
<b>Arena (%)</b>	24.6	18.9
<b>Textura</b>	Franco limoso	
<b>Materia orgánica (%)</b>	3.36	1.28
<b>Consistencia</b>	Ligeramente plástico	Muy plástico
	Ligeramente adhesivo	Muy adhesivo
<b>Gran Grupo /Sub grupo</b>	Argiudol vértico	

#### 4.1 Ensayo de laboratorio: medición de la fuerza de adhesión normal

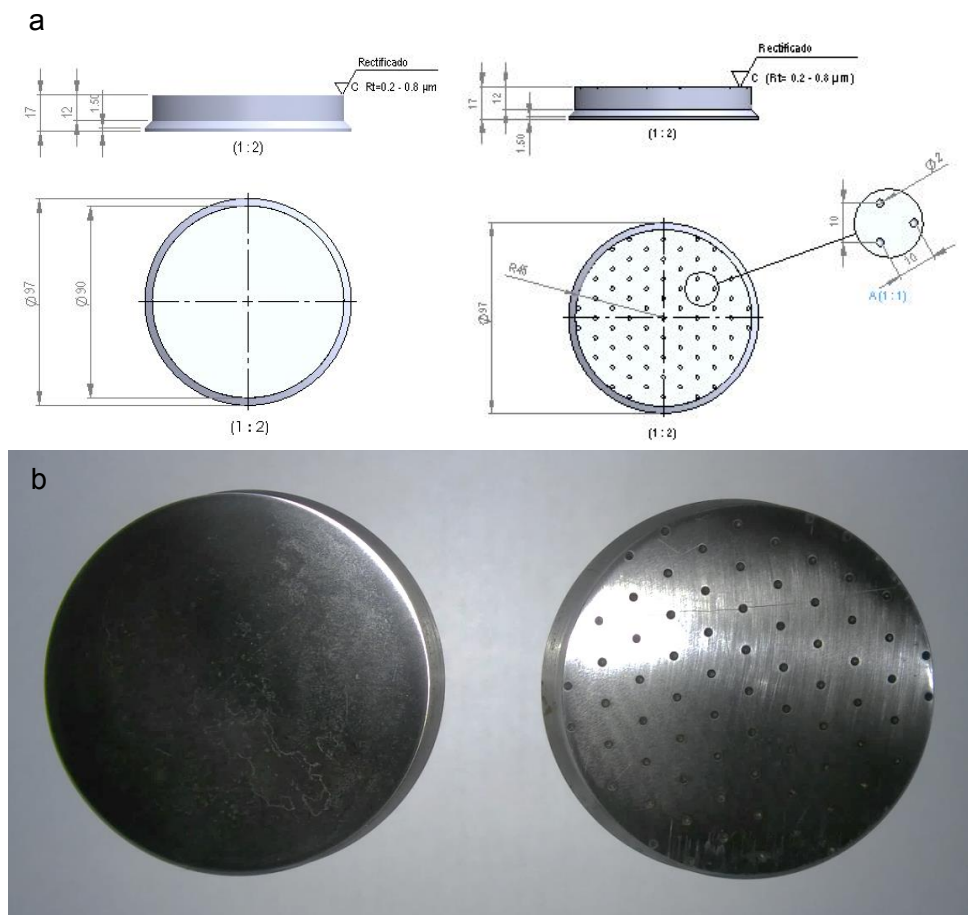
Este ensayo se realizó para conocer la influencia de la incorporación de cavidades en la superficie metálica de una probeta de forma circular plana sobre la fuerza de adhesión normal respecto a la humedad gravimétrica del suelo. La adhesión normal, fue considerada como el valor de la fuerza vertical máxima necesaria para separar la probeta de acero en contacto con la superficie del suelo contenido en un cilindro metálico.

Para ello se midió la fuerza de adhesión entre 44 muestras de suelo tomadas al azar y probetas de acero SAE 1045 con dos texturas superficiales, una biomimética (Bio1) y la otra lisa como testigo (Lisa) (Tabla 2).

**Tabla 2:** Caracterización de la textura superficial mecanizada sobre la probeta.

Nombre	Patrón	Distribución	Geometría	Diámetro
Bio1	Hexagonal	homogéneo	Cavidad Semiesférica	2 mm

Las probetas fueron de forma circular, planas, de un diámetro de 90 mm y un espesor de 17 mm, generando una superficie de contacto de 6362 mm<sup>2</sup> (Figura 13).



**Figura 13:** a) Planos y b) fotografías de las probetas Lisa y Bio1 utilizadas para medir la adhesión normal contra el suelo.

Las muestras de suelo fueron extraídas en el mismo sitio experimental donde se realizaron los ensayos de campo. Se emplearon cilindros de acero inoxidable de un diámetro interior de 109 mm y 32 mm de altura. La profundidad de extracción de las

muestras fue de 150 mm, que es equivalente a la profundidad de trabajo de las púas en el ensayo a campo (Figura 14).



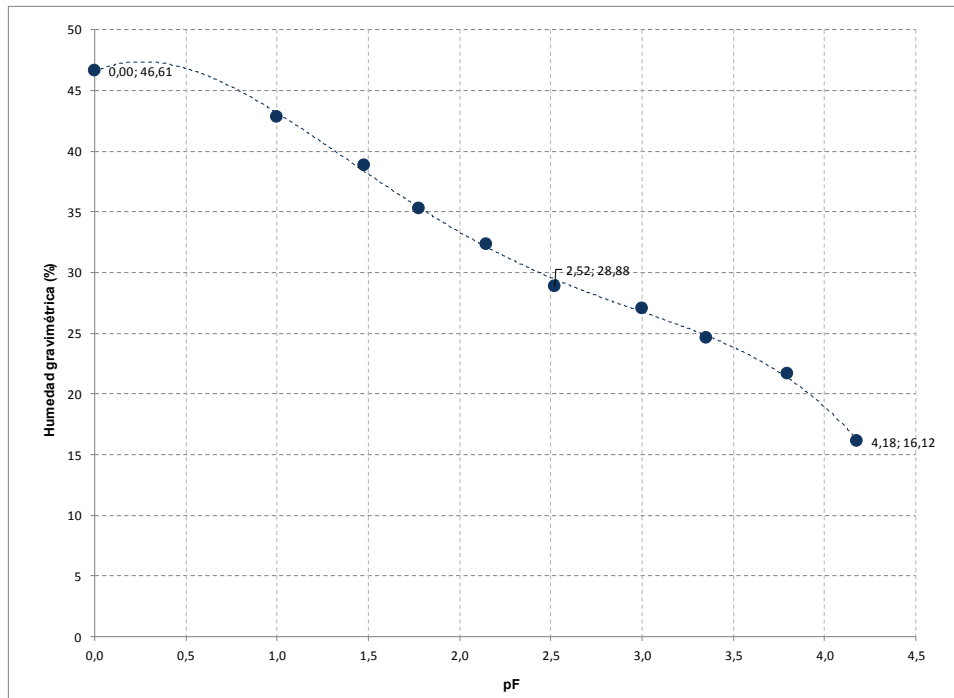
**Figura 14:** Detalle de la secuencia de extracción de muestras sobre las cuales se midió la adhesión normal entre el suelo y el metal.

Complementariamente se determinó la curva de retención hídrica, utilizando un equipo extractor de presión membrana (Soil-Moisture) y se siguió como referencia la metodología descrita en Agriculture Handbook n°60 (USDA) en Allison et al., (1954), con el fin de conocer la relación entre la humedad gravimétrica y el potencial mátrico del suelo ( $\Psi_m$ ). Fueron extraídas 3 muestras en el horizonte Ap del sitio experimental a través de cilindros de acero inoxidable de 50 mm de diámetro y 50 mm de altura, a una profundidad media de 75 mm representativa a la que trabajó la púa. Las muestras de suelo fueron colocadas en los contenedores correspondientes, hidratadas lentamente y una vez

húmedas, se mantuvieron durante 48 horas en contacto con agua destilada para alcanzar la saturación. Las presiones de trabajo empleadas fueron equivalentes a 10, 20, 60, 120, 330, 1000, 2000, 4000, 8000 y 15000 cm de columna de agua. En cada ciclo de carga, se dejó transcurrir el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio entre la presión actuante y la retención del agua por parte del suelo. Una vez alcanzado este objetivo, las muestras fueron pesadas en una balanza electrónica con resolución de 0,01 g y sometidas a un nuevo ciclo de carga hasta alcanzar las 15 atmósferas de presión. Las curvas de retención hídrica se construyeron graficando la humedad gravimétrica en función del logaritmo de la columna de agua medida en centímetros (pF) que equivale a la succión con que es retenida el agua en el suelo (potencial mátrico). Para tal fin se efectuaron regresiones utilizando polinomios de cuarto grado.

La Figura 15 representa la curva de retención hídrica, es decir el contenido de humedad gravimétrica (%) en función del potencial mátrico del suelo ( $\Psi_m$ ), expresado como el log10 de la altura de la columna de agua en centímetros (pF). Fueron determinados los contenidos de humedad del suelo a capacidad de campo, en coeficiente de marchitez permanente y el agua útil de los horizontes superficiales, obteniéndose resultados coherentes con su clase textural.

A un pF igual a cero, todos los poros se encuentran saturados con agua. La ausencia de aire implica la no existencia de meniscos, debido a lo cual, el  $\Psi_m$  también es cero. En este punto, el contenido de humedad (46,61 %) es fiel reflejo del volumen del espacio poroso que posee el suelo. A la presión normalmente adoptada para determinar la capacidad de campo en suelos texturales, que equivale a 330 cm de columna de agua o a un pF de 2,52, el valor obtenido de humedad fue de 28,88 %.

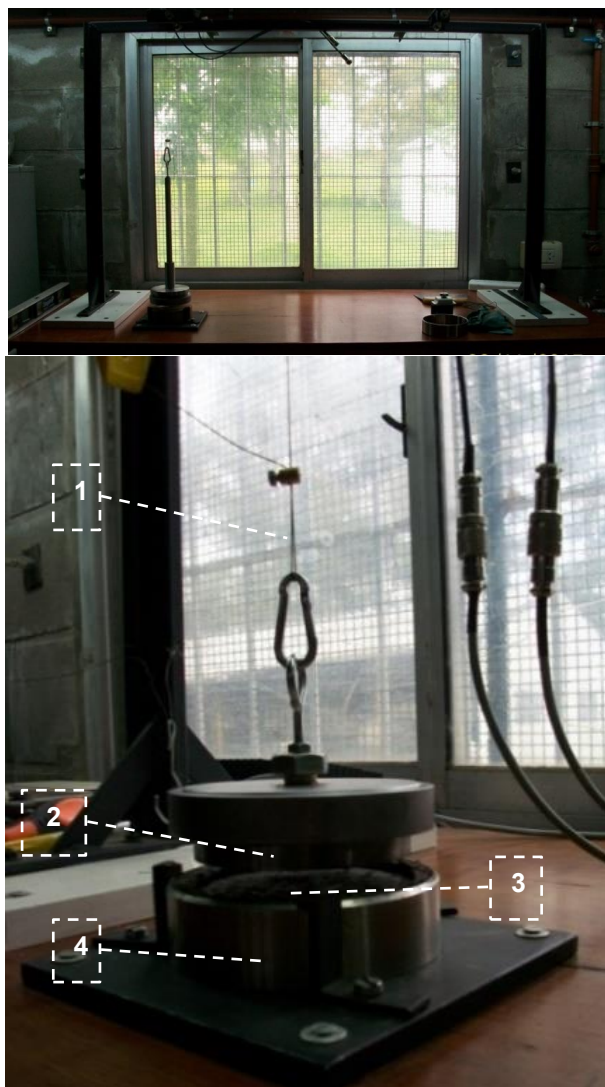


**Figura 15:** Curvas de retención hídrica obtenidas a partir de muestras de suelo inalteradas extraídas del horizonte A. Polinomio de ajuste:  $y = -0,592x^4 + 5,1673x^3 - 14,574x^2 + 6,6015x + 46,566$  ( $R^2 = 0,9988$ ).

La curva de retención hídrica además de ser empleada con el fin de caracterizar el suelo en estudio y proveer información para el análisis de los resultados, fue utilizada para las muestras de suelo en la medición de adhesión. Luego de ser extraídas las muestras del sitio experimental, los cilindros con suelo fueron colocados durante 72 h en unas bandejas que contenían una lámina de agua hasta alcanzar el contenido hídrico de saturación. Una vez establecida la curva, se sometió a estas muestras a las presiones necesarias para conseguir determinados valores de humedad y así cubrir el rango de humedades necesario.

Para asegurar un íntimo contacto entre la superficie del suelo y la superficie metálica y con anterioridad a realizar la medición de adhesión se ejerció una presión equivalente a 2,0 bar durante 60 segundos, entre la superficie metálica y el suelo.

Para cuantificar la fuerza de adhesión normal fue diseñado un instrumento que permitió incrementar gradualmente la tensión (fuerza) y simultáneamente registrar su valor a través de dos celdas de carga de 5,0 kgf marca Flexar modelo CDL (Figura 16). Los datos de fuerza fueron capturados por medio de una PC a intervalos configurables de 500 milisegundos. El valor de la fuerza normal de adhesión fue relacionado con la superficie de contacto y se expresó en kilopascales (kPa).

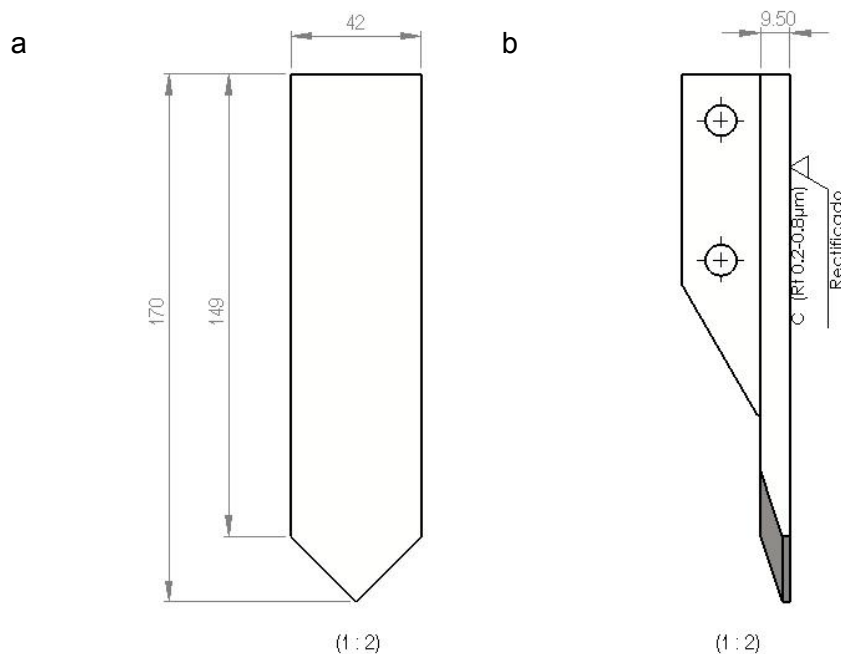


**Figura 16:** Detalle del instrumento para realizar la medición de la fuerza normal de adhesión entre la superficie metálica y el suelo. Referencias: 1) Hilo tensor; 2) Probeta para realizar la medición; 3) Muestra de suelo; 4) Cilindro metálico de extracción de muestras de suelo.

El manejo estadístico de la variable adhesión normal fue efectuado mediante análisis de co-varianza. Se empleó el análisis de regresión lineal para encontrar la relación matemática entre la adhesión (kPa) y la humedad gravimétrica (%) de las muestras de suelo para las dos superficies (Bio1 y Lisa). Para determinar los valores máximos de las curvas se realizaron derivadas segundas de las funciones y se calcularon las raíces para establecer los valores de humedad donde el valor de adhesión fue 0.

#### 4.2 Ensayo de campo: determinación de la demanda de tracción

Fueron mecanizadas en acero SAE 1045 dos púas de características similares a las comerciales (Figura 17). El acabado superficial de las púas fue el de un rectificado grueso (IRAM 4537). La púa Lisa se empleó como testigo.



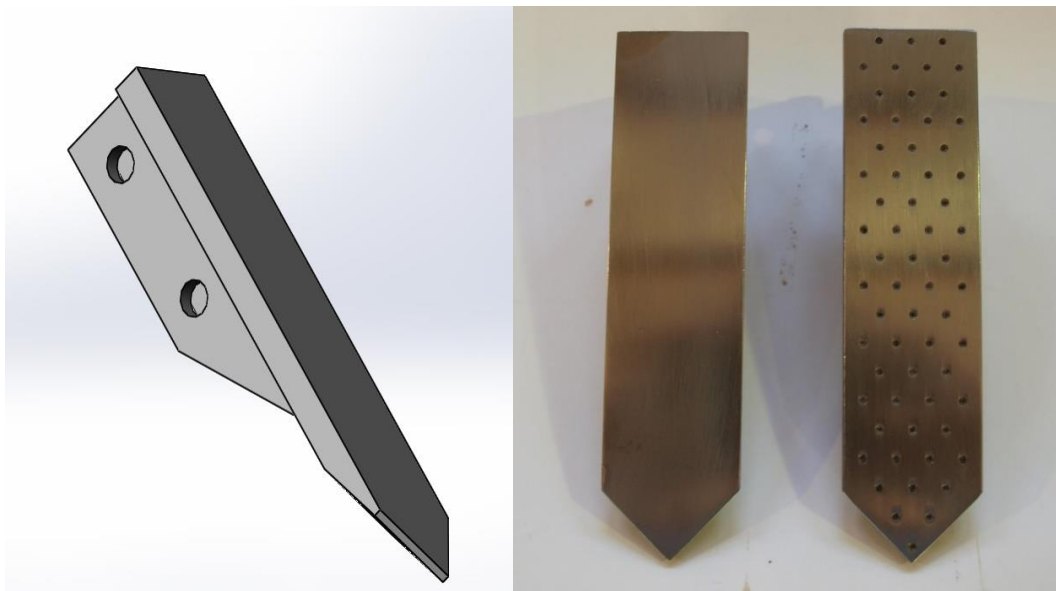
**Figura 17:** Planos de la púa con las principales dimensiones. a) vista frontal b) vista lateral. Escala 1:2.



En la púa biomimética, siguiendo un patrón de un triángulo equilátero, en su vértice se mecanizaron las cavidades semiesféricas de 2 mm de diámetro y 10 mm de separación entre ellas, como se detalla en la Tabla 3 y Figura 18. El área plana de contacto de la púa fue de 6489 mm<sup>2</sup>, y el área representada por las cavidades fue de 194,8 mm<sup>2</sup>. El cociente entre estas dos áreas es una medida de la densidad de las cavidades y en este caso fue de 0.0299.

**Tabla 3:** Caracterización del patrón superficial mecanizado sobre la púa. Referencias: Cav) Cavidades;  $A_{cav}$ ) Área cavidades (mm<sup>2</sup>) y  $A_p$ ) Área plana de contacto con el suelo de la púa (mm<sup>2</sup>).

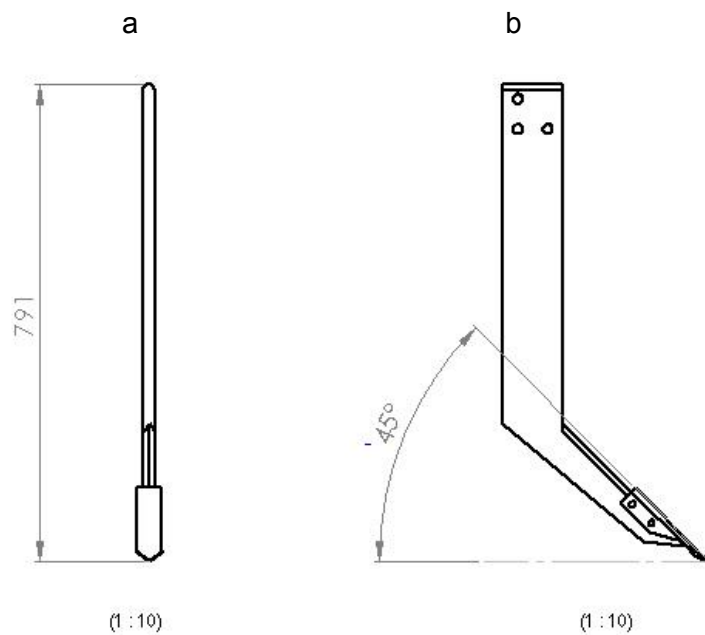
Nombre	Patrón	Geometría	Diámetro	Densidad (Cav./púa)	Relación $A_{cav}/A_p$
Bio1	Triángulo	Cavidad Semiesférica	2 mm	62	0,0299



**Figura 18:** a) Vista 3D de la púa. b) Fotografía de las dos púas empleadas en el ensayo. De izquierda a derecha: púa lisa (testigo) y púa biomimética.

La medición de la fuerza de tracción requerida por cada púa se realizó mediante un carro dinamométrico que consiste en un instrumento de captura triaxial de fuerzas diseñado

y desarrollado en el Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos (IIR-CIA INTA). Este dispositivo permite medir las reacciones del suelo sobre el órgano activo evaluado en los sentidos axial, vertical y transversal a la dirección de avance como así también, la velocidad de desplazamiento y la profundidad de trabajo instantáneas. Las púas fueron colocadas sobre el carro dinamométrico en un escarificador de arco rígido que le proporcionó un ángulo de ataque de  $45^\circ$  (Figura 19).



**Figura 19:** a) Vista frontal del conjunto escarificador de arco rígido y púa. b) Vista lateral del conjunto escarificador de arco rígido y púa. Escala 1:10.

El área experimental fue dividida en cuatro sitios homogéneos (sitios) (Figura 12). A su vez, dentro de estos sitios y a fin de minimizar el error ocasionado por las variaciones que puede presentar la condición del suelo, fueron delimitados 3 sectores en los cuales se aparearon al azar los surcos generados por los distintos diseños de púas (sector). Cada sector representó entonces un bloque completo, pues en él se incluyeron todos los tratamientos.

El procedimiento consistió en desplazar el carro dinamométrico mediante un tractor marca New Holland modelo 7020 con tracción delantera asistida de 5250 kg y 113 kW de potencia haciendo trabajar cada uno de los órganos activos a lo largo de una trayectoria de 100 metros de longitud, a una velocidad efectiva de avance de  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  y una profundidad media de labor de 150 mm (Figura 20). El surco generado en el suelo constituyó la unidad experimental. La demanda de fuerza requerida a lo largo de esa trayectoria, fue captada por las celdas de carga electrónicas del instrumento y almacenada a intervalos de un segundo en un sistema electrónico de registro de datos. El diseño experimental fue en bloques unifactorial completamente aleatorizado donde el factor fue la rugosidad superficial y los niveles fueron 2, incluyendo una púa de superficie lisa como testigo. Por lo tanto, el número de tratamientos fue de 2 y cada uno de ellos se repitió 12 veces (3 bloques en cada uno de los 4 sitios).



**Figura 20:** Detalle del sitio experimental y del dispositivo de captura de datos traccionado por un Tractor New Holland.

En forma complementaria a la medición de la demanda de tracción se relevaron algunos parámetros físicos antes de realizar los surcos (humedad gravimétrica, densidad aparente, resistencia a la penetración) y después (el perfil del suelo alterado y su grado de desmenuzamiento).

Las muestras de humedad se extrajeron mediante un barreno, en un rango de profundidad de 0 a 150 mm y se tomaron 6 repeticiones distribuidas al azar por sitio (Tabla 4).

**Tabla 4:** Humedad gravimétrica del suelo y su coeficiente de variación en los cuatro sitios.

Sitio	Humedad Gravimétrica							
	Profundidad (mm)				CV (%)			
	0-50	51-100	101-150	Media	0-50	51-100	101-150	Total
I	33,1	30,0	29,9	<b>31,0</b>	6,0	7,9	2,9	<b>5,6</b>
II	25,3	27,9	30,2	<b>27,8</b>	2,7	9,4	14,6	<b>8,9</b>
III	32,5	34,6	29,9	<b>32,3</b>	0,3	2,1	15,9	<b>6,1</b>
IV	24,9	27,4	25,0	<b>25,8</b>	2,2	7,3	12,8	<b>7,4</b>

El contenido hídrico del suelo en el área experimental al momento de realizar el ensayo a campo fue elegido con el fin de promover la adhesión entre la superficie de la púa y el suelo. Esta situación no coincidió con la humedad óptima para realizar la labor de una labranza vertical, donde se produciría la máxima remoción con el menor consumo de energía. Sino aquella en la cual la púa deslizará sobre un suelo con un contenido hídrico superior, y a su vez los macroporos del suelo estén ocupados con aire, situación en la cual la adhesión comienza a manifestarse más acentuadamente. El rango de la humedad gravimétrica en toda el área experimental, entre los 0 y 150 mm de profundidad, fue entre 24,91 y 34,55 %. El valor medio de la humedad gravimétrica fue de 29,23 %. Este valor fue coincidente con el contenido de hídrico de capacidad de campo (28,80 %)

Fueron determinados los límites de Atterberg sobre muestras representativas del horizonte Ap de toda el área experimental y se clasificó el suelo según la S.U.C.S- AASHTO, el cual perteneció a la categoría ML (limo de baja plasticidad). Para el límite líquido se empleó la norma IRAM 10513 y para el límite plástico e índice de plasticidad fue usada la norma IRAM 10502. El límite plástico se alcanzó con una humedad del 26,0 % y el límite líquido con una humedad del 36,2 %, por lo que el índice de plasticidad (diferencia entre ambos) fue de 10,2 % (Tabla 5).

**Tabla 5:** Límites de Atterberg del suelo utilizado durante los ensayos.

Límites de Atterberg	(%)
Límite plástico (%)	26,0
Límite líquido (%)	36,2
Índice de plasticidad (%)	10,2

La densidad aparente se determinó a fin de caracterizar el estado de este parámetro en el área experimental, a partir de muestras de suelo contenidas en cilindros metálicos de volumen y peso conocidos. Las muestras fueron mantenidas dentro de sus respectivos cilindros, pesadas en húmedo y luego secadas en estufa a 105° C hasta peso constante. En este caso también se tomaron 6 muestras distribuidas al azar por sitio a tres profundidades (Tabla 6).

**Tabla 6:** Densidad aparente del suelo y coeficiente de variación de los sitios utilizados.

Sitios	Densidad aparente							
	g cm <sup>-3</sup>				CV (%)			
	Profundidad (mm)			Media	Profundidad (mm)			Total
0-50	51-100	101-150	0-50		51-100	101-150		
I	1,11	1,23	1,22	<b>1,19</b>	3,8	4,7	1,6	<b>3,4</b>
II	1,27	1,39	1,39	<b>1,35</b>	14,1	8,1	3,4	<b>8,5</b>
III	1,04	1,24	1,34	<b>1,20</b>	10,6	1,5	6,1	<b>6,0</b>
IV	1,31	1,40	1,47	<b>1,39</b>	6,0	5,0	2,1	<b>4,4</b>

La resistencia a la penetración fue determinada con un penetrómetro marca Fieldscout modelo SC 900 Soil compaction meter, realizando 9 transectas por sitio en un rango de profundidades entre 0 a 200 mm (Tabla 7).

**Tabla 7:** Resistencia a la penetración del suelo (IC) y coeficiente de variación (CV) de los sitios utilizados.

Sitios	Resistencia a la penetración									
	kPa					CV (%)				
	Profundidad (mm)					Profundidad (mm)				
	0-50	51-100	101-150	151-200	Media	0-50	51-100	101-150	151-200	Total
I	343	694	795	1182	<b>753</b>	28,9	33,1	45,5	45,7	<b>38,3</b>
II	516	737	710	1041	<b>751</b>	36,4	33,5	36,0	32,8	<b>34,7</b>
III	569	546	1201	1716	<b>1008</b>	58,1	51,6	44,0	39,1	<b>48,2</b>
IV	580	604	819	1068	<b>768</b>	81,2	71,3	49,7	46,9	<b>62,3</b>

Para determinar la sección de suelo removido por las púas se utilizó un perfilómetro (Figura 21). Este dispositivo posee una longitud de 1000 mm y cuenta con varillas distanciadas cada 50 mm, las cuales fueron introducidas hasta que interceptaron suelo consolidado. Para efectuar las mediciones, el perfilómetro fue ubicado perpendicular a los surcos, de modo tal que su centro coincidiera con la trayectoria de las púas. Los valores más alejados del centro se consideraron el nivel de referencia del suelo y la diferencia entre éste, y la posición de las varillas centrales, permitió calcular la sección de suelo removida por acción de las púas. Empleando el software Solidworks se calculó el área removida en cm<sup>2</sup>. A través del cociente entre la fuerza de tracción y el área removida, se calculó el coeficiente de labranza, como indicador de la eficiencia energética de la labranza y fue expresada en kPa. Esta relación entre la fuerza de tracción y el área removida es el mejor indicador de la eficiencia de una labranza (Godwin, 2006).



**Figura 21:** Detalle del perfilómetro utilizado para determinar el área removida luego del laboreo de las púas.

El grado de desmenuzamiento del suelo se determinó a partir de la recolección de suelo removido inmediatamente después del laboreo de las púas. Se tomaron 3 muestras de 10 kg del horizonte Ap. Posteriormente fueron secadas al aire y tamizadas manualmente con tamices: 76,20 - 19,05 - 6,75 - 4,76 - 2,38 - 1,00 - 0,50 mm (1, 2, 3, 4, 8, 18 y 35 mesh) y fueron pesadas en una balanza electrónica con resolución de 0,01 g.

La demanda de tracción fue analizada mediante análisis de varianza y a través de estadística no paramétrica empleando la prueba de Wilcoxon. Complementariamente se realizaron contrastes ortogonales, pruebas de comparaciones múltiples de Tukey y la prueba “t” en la comparación de surcos apareados. El área de la sección transversal del surco, el coeficiente de labranza y el grado de desmenuzamiento fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA. Se empleó el software estadístico Statgraphics Centurion.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Ensayo de laboratorio: medición de la fuerza de adhesión normal

El resultado del análisis de co-varianza de la adhesión normal, utilizando como co-variable la humedad de las muestras de suelo, alcanzó significación estadística ( $F=30,67$ ;  $p \leq 0,0001$ ) y el efecto de la variación de las superficies resultó significativo ( $F=19,39$ ;  $p=0,0001$ ). En promedio, la adhesión obtenida con la superficie Bio1 fue un 45 % menor que la obtenida con la superficie Lisa. La co-variable fue altamente significativa ( $F=54,61$ ;  $p \leq 0,00001$ ) (Tabla 8).

**Tabla 8:** Resultado de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey de la adhesión en función de la superficie. Cantidad de datos, adhesión media ajustadas por efecto de la co-variable, intervalos de confianza (95%) y grupos homogéneos según Tukey. Nivel de significación 0,05.

Superficie	n	Adhesión media (kPa)	Intervalos de confianza (95 %)		Grupos homogéneos
			Inferior	Superior	
Bio 1	22	1,23	0,91	1,55	<b>a</b>
Lisa	22	2,24	1,92	2,56	<b>b</b>

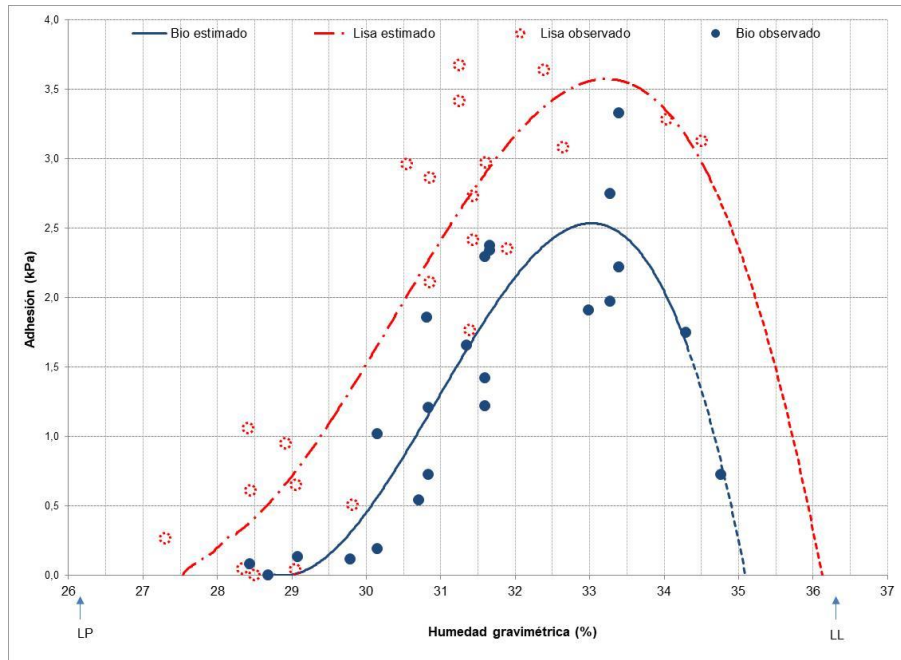
Probablemente la incorporación de las cavidades sobre la superficie metálica provocó una discontinuidad en la lámina de agua y esto habría impactado sobre la fuerza de adhesión, causando que la adhesión con la superficie Bio1 haya sido menor a la obtenida con la Lisa. Qaisrani et al., (1993) expresaron que la morfología rugosa reduce la adhesión por diversos motivos. Por un lado, produce la ruptura de la película de agua a medida que el suelo se desliza por la superficie rugosa, reduce la superficie de contacto efectiva, origina la permanencia de aire atrapado en la concavidad y debido al incremento de la presión expulsa el agua de la matriz del suelo, generando un efecto lubricante.

Del análisis de regresión entre la adhesión normal y la humedad gravimétrica, se desprende que el mejor ajuste se logró a través de un modelo polinómico de tercer grado, ya



sea para la superficie Lisa ( $F=35,99$ ;  $p\leq 0,00001$  y  $R^2=86,4\%$ ), como para la Bio1 ( $F=21,47$ ;  $p\leq 0,00001$  y  $R^2=76,3\%$ ). La curva que refleja la relación polinómica entre la adhesión (kPa) y la humedad gravimétrica (%) del suelo de la superficie Lisa estuvo por encima de la curva Bio1 en sus valores de abscisa (Figura 22). Es decir, la superficie Lisa siempre alcanzó valores más altos de adhesión que la superficie Bio1, para todo el rango de humedad (27,5 y 36,1 %). Esta relación polinómica coincide con lo exhibido por Harsono (2011) al evaluar la respuesta de la adhesión en función de la humedad de tres materiales diferentes (metálico, cerámica y nylatrón). El autor explica los valores bajos de adhesión por la baja tensión de humedad cuando el suelo está seco y un efecto de lubricación a valores altos de humedad.

Como puede apreciarse en la Figura 22, los valores de adhesión se incrementaron sustancialmente entre el límite plástico (26,0 %) y el límite líquido (36,2 %) del suelo. Esta tendencia coincide con lo expresado por Soni & Salokhe (2006) quienes indicaron que la adhesión se incrementa entre los límites plástico y líquido. Ellos encontraron que la humedad del suelo tuvo un efecto significativo sobre la adhesión normal, con humedades del orden del 36 %, obtuvieron los valores más altos de adhesión, que varió en función de las superficies evaluadas entre 90 y 240 N. Cuando la humedad se incrementó hasta el 60 % se obtuvo una fuerza de adhesión del orden de 15 a 50 N, en cambio a valores bajos de humedad (19,8 %), la fuerza varió entre 2 y 3 N.



**Figura 22:** Adhesión normal (kPa) en función de la humedad gravimétrica (%) del suelo para las dos superficies metálicas: Lisa y Bio1: Referencias: Bio estimado) Valores estimados de la relación estadística entre la adhesión y humedad (%) a través de una función polinómica de tercer grado; Bio observado) Valores observados de adhesión sobre la superficie Bio1; Lisa estimado) Valores estimados de la relación estadística entre la adhesión y humedad (%) a través de una función polinómica de tercer grado; Lisa observado) Valores de adhesión observados de la superficie Lisa. LP) Límite plástico; LL) Límite líquido (Límites de Atterberg).

En estas curvas pueden distinguirse cuatro fases. La inicial en donde la superficie Lisa comienza a adherirse al suelo a partir de un valor de 27,5 % de humedad, en cambio la Bio1 lo hace con 28,9 %. Se observó que la superficie Lisa expresa un comportamiento adhesivo a un valor más bajo de humedad. Este valor coincide con el contenido hídrico de capacidad de campo que para este ensayo fue a una humedad de 28,8 %. A partir de estos puntos los incrementos de la humedad son acompañados con pequeños aumentos en la adhesión. Luego la función continúa con una fase lineal caracterizada por una relación proporcional entre las variables. La tercera fase comprende una relación parabólica y es alcanzado el valor máximo de la función que para el caso de la superficie Lisa fue de 3,57 kPa y para la Bio1 fue de 2,52 kPa, exhibiendo esta última una disminución del 29,4 % (Tabla 9). La última etapa fue nuevamente lineal, pero en este caso con pendiente negativa,

es decir que los incrementos de la humedad se vieron reflejados en una reducción de la adhesión. Las partes descendentes de las curvas están poco exploradas por los datos es decir que están construidas con pocos puntos. Esto fue debido a que, a humedades elevadas, el suelo presentó poca resistencia mecánica y cuando se aplicó la carga para asegurar el contacto entre ambas superficies, la probeta penetró varios milímetros sobre el suelo. Fue así que se generó un plano adicional de adhesión provocando un error en la medición. No obstante, esto ocurrió en humedades superiores al 35 %, es decir que fue a valores más altos de la humedad máxima de los ensayos de campo. La adhesión vuelve a valores cercanos a 0 cuando la humedad se acercó al 35 % en la Bio1 y 36,1 % para la superficie Lisa, antes de alcanzar la humedad de saturación del suelo, que fue de 46,6 %.

**Tabla 9:** Valores de humedad gravimétrica del suelo y de adhesión máxima (kPa) para las dos superficies

Superficie	Humedad gravimétrica (%)			Adhesión máx. (kPa)
	No- adhesión	Adhesión máx.	No- adhesión	
Lisa	27,54	33,22	36,12	3,57
Bio1	28,88	33,02	35,08	2,52

Tong et al., (1994a) evaluando el ángulo de contacto, la adhesión y la resistencia al deslizamiento en vertederas con distintos recubrimientos superficiales (a- esmalte, b- PES+PTFE, c- acero aleado + epoxy y d- acero convencional), registraron valores de adhesión entre 0,25 y de 1,46 kPa, correspondiendo este último valor a la superficie del acero, todos con una humedad gravimétrica del 26,8 %. Ellos informaron que la reducción en la fuerza de adhesión fue principalmente por una variación en la resistencia viscosa de la película de agua. El valor de adhesión obtenido con el acero convencional es sensiblemente superior al hallado en el presente ensayo, ya que esa magnitud fue alcanzada con la superficie Lisa, equivalente a la del acero convencional, a una humedad aproximada del 30

% (Figura 22). Esta diferencia podría deberse a un menor porcentaje de arcilla que contiene el suelo empleado en este ensayo, coincidiendo con lo manifestado por Ren et al., (2001) y Soni & Salokhe (2006), quienes reportaron que la adhesión depende del porcentaje de arcilla del suelo.

Satomi et al., (2012) en un trabajo realizado sobre suelos plásticos (IP: 29,6 %) y con mayor densidad aparente ( $2,74 \text{ gr cm}^{-3}$ ), informaron incrementos de la adhesión frente a aumentos de la humedad y reportaron menores valores empleando como superficie la cutícula de un insecto (2,7 kPa) respecto a la superficie de acero normal (4,0 kPa), brillante (4,2 kPa) y rugosa (3,3 kPa). Ellos indicaron que el aumento del factor de rugosidad, provoca una alteración en el ángulo de contacto de la gota y una consecuente reducción de la adhesión.

La influencia de la variación de la humedad sobre la adhesión fue explicada por Soni & Salokhe (2006). Cuando el contenido de agua del suelo es cercano a 0, en muestras secadas a estufa, la adhesión es baja y la fuerza de la interfaz que toma relevancia es la fricción. A medida que se incrementa el contenido de agua, toma relevancia la adsorción físico-química entre las partículas. Para una humedad cercana a capacidad de campo se incluye la adsorción capilar negativa y la adhesión producida por el menisco. Cuando el suelo se encuentra saturado de agua las fuerzas producidas en la interfaz corresponden a la tensión del menisco y la viscosidad.

## 5.2 Ensayo de campo: determinación de la demanda de tracción

A partir de los resultados del análisis de varianza pudo evidenciarse un efecto estadísticamente significativo de los tratamientos ( $F=13,71$ ;  $p=0,0002$ ). La fuerza de tracción media de la púa Lisa fue de 100,19 kgf, en cambio para la púa Bio1 fue de 96,24 kgf (Tabla 10). En estas condiciones particulares de ensayo, la reducción en la fuerza de tracción de la púa Bio1 respecto a la Lisa fue del orden del 3,95 %.

**Tabla 10:** Valores medios de la fuerza de tracción, desvío estándar, intervalos de confianza (95%) y resultado de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey de cada una de las púas evaluadas. Nivel de significación 5%.

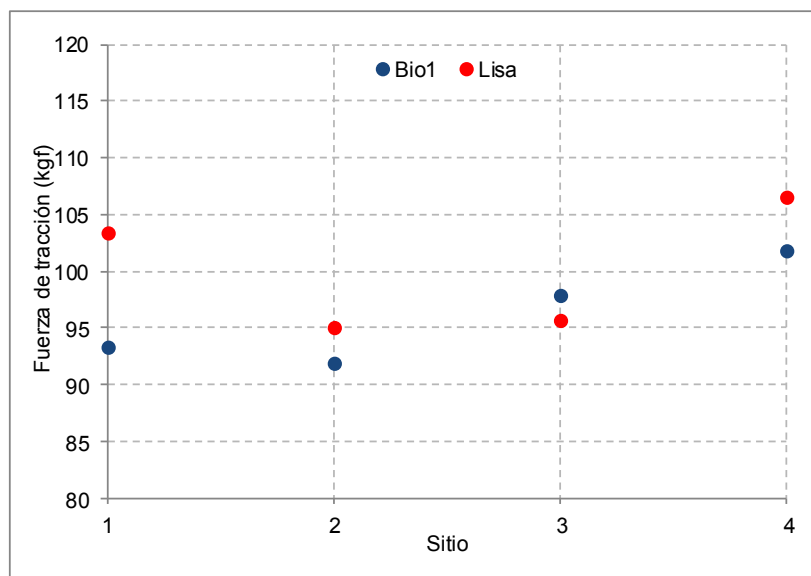
Tratamiento	Fuerza de tracción media (kgf)	Desvío Estándar (kgf)	Intervalos de confianza (95%)		Grupos homogéneos
Bio1	96,24	6,8	94,80	97,70	a
Lisa	100,19	7,8	98,74	101,64	b

El contraste ortogonal para comparar la púa Bio1 con la púa Lisa arrojó un nivel de significación del 3,94 %, es decir que la diferencia en la demanda de tracción entre la púa Bio1 con la superficie Lisa también resultó estadísticamente significativa.

Este resultado coincide, aunque en un orden de magnitud menor, con lo manifestado por Sun et al., (2018), quienes evaluaron superficies bioinspiradas a partir de la piel del tiburón blanco sobre escarificadores de arco rígido, curvo y con púas con alas. A través de un modelo DEM, encontraron reducciones de la fuerza de tracción del orden del 20 % cuando modificaron la superficie del arco y entre el 15 y 20 % cuando lo hicieron sobre la superficie de la púa, ambos respecto al testigo con la superficie sin modificar.

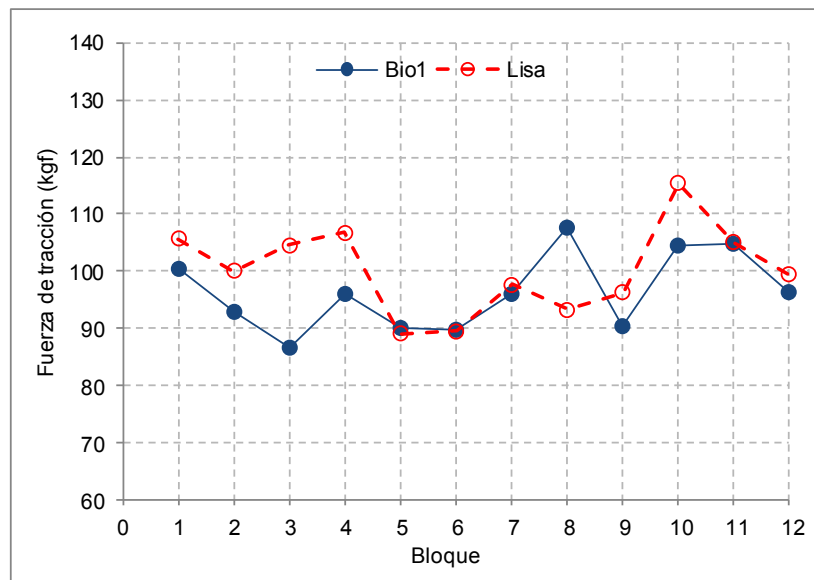
Para poder relacionar la fuerza de tracción con las variables que fueron tomadas para caracterizar la condición del suelo al momento de realizar el ensayo, es decir la

humedad gravimétrica, la densidad aparente y la resistencia a la penetración, el análisis de los resultados fue a nivel sitio, debido a que el muestreo se realizó a esa escala. En condiciones de elevada humedad (31,0 %) y baja o moderada resistencia a la penetración del suelo (753 kPa) y una densidad aparente relativamente baja (1,19 gr cm<sup>-3</sup>), situación encontrada en el Sitio I, la púa biomimética presentó un mejor comportamiento respecto de la Lisa. Cuando se mantuvieron las condiciones de elevada humedad (32,3 %), igualdad en la densidad aparente (1,20 gr cm<sup>-3</sup>), pero un incremento en la resistencia a la penetración (1008 kPa) el comportamiento fue contrario (Sitio III). Esto se detallará más adelante, pero en realidad la diferencia se produjo en una de las tres series de datos correspondiente a cada surco. En cambio en los sitios donde la humedad (cercana al 25 %) y la resistencia a la penetración fue relativamente baja (760 kPa), pero con densidad aparente elevada (1,37 gr cm<sup>-3</sup>), la púa biomimética tuvo, en promedio, un resultado mejor que la Lisa (Sitio II y IV) (Figura 23).



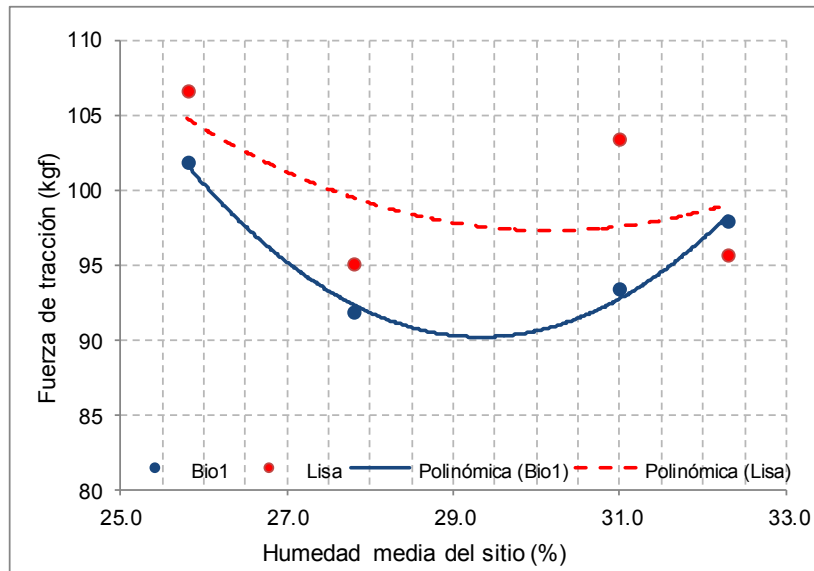
**Figura 23:** Gráfico de la fuerza de tracción en cada uno de los sitios. Cada punto es el promedio de los valores de tracción obtenidos en la serie de datos de tres surcos contiguos.

En el estudio de surcos apareados, se contrastaron las dos púas. La Bio1 obtuvo menor demanda con diferencias significativas en cuatro de ellos sobre un total de doce surcos (Figura 24). El análisis de las diferencias de la totalidad de los surcos, a través de la prueba no paramétrica de Wilcoxon, indicó una probabilidad de que sea cierta la  $H_0$ , (hipótesis de igualdad de medias) de 3,26 %.



**Figura 24:** Gráfico de interacción de la fuerza de tracción media (kgf) de los distintos tratamientos (púa Lisa y Bio1) en cada uno de los bloques.

La fuerza de tracción media en función de la humedad media del suelo de cada sitio puede observarse en la Figura 25. Puede notarse que la fuerza de tracción de la púa Lisa supera a la Bio1 en todos los sitios, excepto en el III, el cual presenta la humedad media más alta (32,3 %). La relación entre la fuerza de tracción media y la humedad gravimétrica media del sitio fue representada a través de un polinomio de segundo grado, en donde puede evidenciarse un buen ajuste para la superficie Bio1 ( $R^2= 0,986$ ). En cambio, para la superficie Lisa, el ajuste fue bajo ( $R^2=0,302$ ), evidenciando la existencia de otras fuentes de variabilidad.

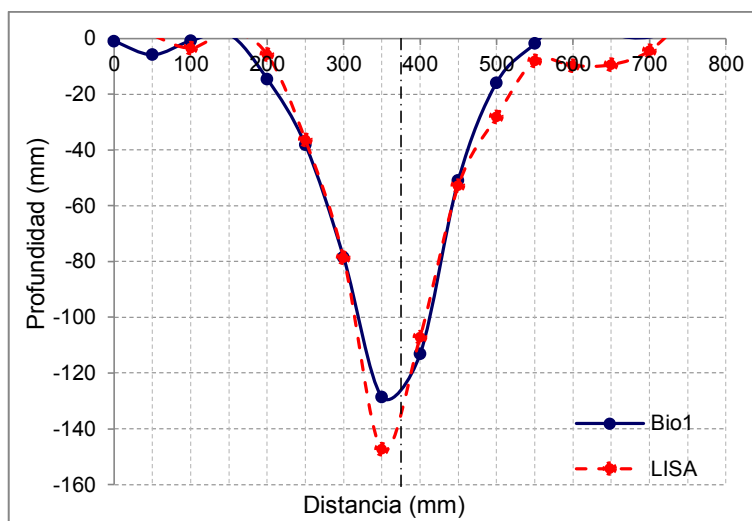


**Figura 25:** Gráfico de interacción de la fuerza de tracción media (kgf) de los distintos tratamientos (púa Lisa y Bio1) en función de la humedad gravimétrica media del sitio.

### Sección de suelo removido

El análisis de varianza del área de la sección transversal generada por cada púa no presentó diferencia estadísticamente significativa ( $F= 0,01$ ;  $p=0,9268$ ). El valor medio para la púa con la superficie Lisa fue de  $228,6 \text{ cm}^2$  y para la Bio1 de  $225,1 \text{ cm}^2$  (Figura 26). El error estándar fue de  $27,1 \text{ cm}^2$  (10,1 %) y  $22,8 \text{ cm}^2$  (11,8 %), para la superficie Lisa y Bio1, respectivamente.

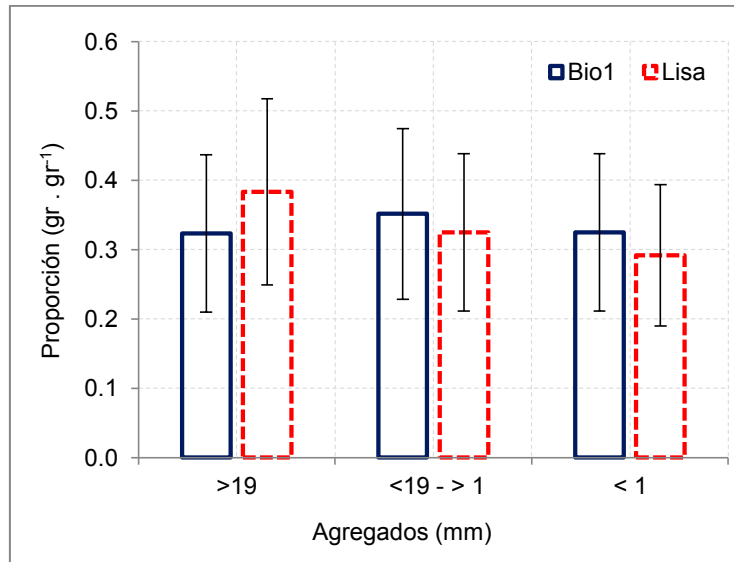




**Figura 26:** Detalle del perfil de suelo alterado de los distintos diseños de púas

### Grado de desmenuzamiento del suelo

El grado de desmenuzamiento del suelo por efecto del laboreo fue similar en las dos púas (Lisa y Bio1). En la fracción de agregados de mayor tamaño, se obtuvo un 38 % y 32 %, con la púa Lisa y Bio1, respectivamente. Esta diferencia no representó significancia estadística ( $F= 0,21$ ;  $p=0,6683$ ). Los agregados de tamaño medio (entre 1 y 19 mm), ocuparon una proporción de 33 % y 35 % con la púa Lisa y Bio1, respectivamente. Asimismo, en este caso la diferencia no fue estadísticamente significativa ( $F=0,24$ ;  $p=0,6512$ ). Por último, los agregados de un tamaño menor a 1 mm, ocuparon una proporción de 29 % y 32 % como resultado del laboreo con la púa Lisa y Bio1, respectivamente. Tampoco se evidenció diferencia significativa según el ANOVA ( $F=0,12$ ;  $p=0,7463$ ) (Figura 27).



**Figura 27:** Proporción de los distintas clases según el tamaño de los agregados del suelo removido por las púas Bio1 y Lisa. Referencias: >19) Agregados mayores a 19 mm; <19->1) Agregados de un tamaño entre 1 y 19 mm; <1) Agregados de un tamaño menor a 1 mm.

A partir de los resultados descriptos precedentemente fue posible comprobar un similar grado de desmenuzamiento del suelo como resultado del laboreo de las púas, evidenciando que la disminución de la fuerza de tracción de la púa biomimética no se debió a una modificación en esta variable del suelo.

### **Coefficiente de labranza**

El coeficiente de labranza encontrado en la púa Lisa fue de 44,3 kPa y en la púa Bio1, 42,6 kPa. Esta diferencia de 1,7 kPa a favor de la púa Bio1 resultó estadísticamente significativa en este suelo y bajo estas condiciones ( $F=6,53$ ;  $p=0,0106$ ) (Tabla 11). La magnitud del valor del coeficiente, entre ambas púas, coincide con el hallado con un implemento similar sobre el mismo suelo, en este caso fue de 46 kPa (Tesouro et al., 2014).

**Tabla 11:** Valores medios del coeficiente de labranza (kPa), error estándar, intervalos de confianza (95%) y resultado de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey de cada una de las púas evaluadas. Nivel de significación 5%.

Tratamiento	Coeficiente de labranza (kPa)	Error Estándar (kPa)	Intervalos de confianza (95%)		Grupos homogéneos
Bio1	42,60	0,41	41,80	43,40	a
Lisa	44,27	0,51	43,27	45,28	b

Estos resultados coinciden con lo hallado por Zhu et al., (1992) que, al modificar la topografía superficial de un arado de reja y vertedera, encontraron una reducción en la fuerza de tracción entre 2,5-3,5 % y 8,0-12,0 %, en suelos húmedos e inundados, respectivamente. Los mismos autores expresan que las cavidades dispuestas sobre la superficie del arado reducen el área de contacto efectiva y además rompen la continuidad de la película de agua entre el suelo y las superficies metálicas, lo que resulta en una reducción de la adhesión y la resistencia al deslizamiento. Podría esperarse entonces que la modificación de la superficie de las púas permita ampliar su ventana de trabajo, y poder trabajar en condiciones de suelo un poco más alejadas de las óptimas.

Soni & Salokhe (2006) evaluaron la resistencia al deslizamiento de distintas geometrías esferoidales dispuestas sobre la superficie bajo tres humedades en un suelo arcilloso. Con baja humedad de suelo (19,8 %) la geometría esferoide de menor altura obtuvo el valor más bajo de adhesión y ángulo de fricción. En condiciones más húmedas (36,9 % y 60,9 %) todas las geometrías tuvieron una adhesión menor a la Lisa. En cambio, el ángulo de fricción fue más bajo con las geometrías esferoidales de menor tamaño. Li et al., (1995) trabajando con un diseño de un arado biomimético distribuyeron

homogéneamente sobre su superficie protuberancias cuyo diámetro respondió a una distribución gaussiana. Ellos informaron una reducción entre el 6,6 % y 12,7 % en la resistencia al deslizamiento respecto a un arado convencional.

Qaisrani et al., (1992), encontraron una reducción en el esfuerzo de tracción entre el 26 % y 34 % con velocidades de avance de 3,6 y 5,0 km h<sup>-1</sup>, respectivamente. Qaisrani et al., (1993), explicaron estos resultados indicando que a medida que el suelo se desliza sobre la superficie de la cavidad se produce la rotura de la lámina de agua, también por la reducción de la superficie efectiva de contacto, el aire entrampado en la concavidad y el incremento en la compresión ya que produce la expulsión de mayor cantidad de agua, la cual actúa como lubricante.

### **5.3 Relación Tracción – Adhesión**

En la Tabla 12 y en la Figura 28 puede observarse la adhesión normal estimada y la fuerza de tracción en función de la humedad gravimétrica del suelo para la superficie Lisa y Bio1. Resulta interesante relacionar los valores obtenidos con ambas variables, teniendo en cuenta que, la adhesión normal se determinó de manera estática y que, en las condiciones reales de trabajo cuando se obtuvo la demanda de fuerza de tracción, la adhesión incide de forma dinámica.

**Tabla 12:** Valores de humedad gravimétrica media (%), adhesión estimada (kPa) y fuerza de tracción media (kgf) en cada uno de los sitios y para cada superficie.

<b>Sitio</b>	<b>Humedad media (%)</b>	<b>Superficie</b>	<b>Adhesión estimada (kPa)</b>	<b>Fuerza de tracción (kgf)</b>
I	31,0	Lisa	2,4	103,4
		Bio1	1,31	93,4
II	27,8	Lisa	0	95,1
		Bio1	0,17	91,8
III	32,3	Lisa	3,33	95,7
		Bio1	2,33	97,9
IV	25,8	Lisa	0	106,6
		Bio1	0	101,9

La humedad media del sitio I fue del 31,0 % y la adhesión estimada de la superficie Lisa (2,41 kPa) superó en un 86 % a la Bio1 (1,31 kPa). En estas condiciones, donde la componente adhesiva de la resistencia al deslizamiento cobró mayor relevancia, la demanda de tracción de la superficie Bio1 fue inferior a la de la púa Lisa en los tres surcos contiguos del sitio. La fuerza de tracción media del sitio de la púa Bio1 fue 10 kgf menor respecto a la Lisa, siendo los valores de 93,4 y 103,4 kgf, respectivamente.

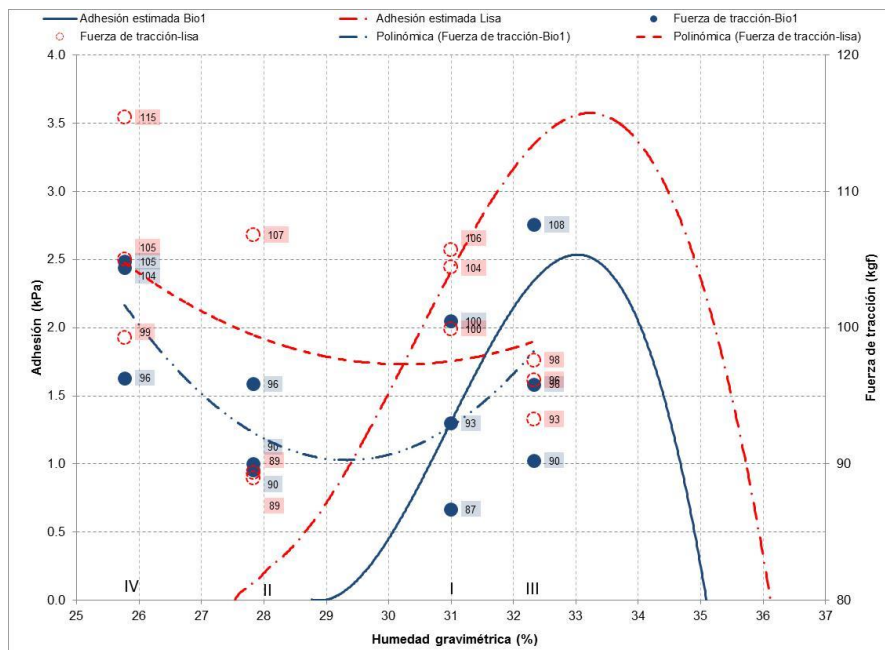
En el sitio II, la humedad media fue del 27,8 % y la adhesión estimada, fue de 0,17 kPa y 0 kPa para la superficie Bio1 y Lisa, respectivamente. La demanda de fuerza de tracción fue similar en dos bloques (5 y 6), pero en el bloque n°4, la púa Lisa alcanzó un valor un 11 % más alto respecto a la Bio1. En este sitio la humedad gravimétrica del suelo presentó una mayor variabilidad espacial (CV: 8,9 %) (Tabla 4). Aunque este coeficiente permaneció dentro de rangos aceptables, puede estar indicando que la humedad del bloque 4 fue superior a la media del sitio y que por lo tanto se acentuó el comportamiento adhesivo del suelo y por consiguiente la demanda de tracción. El promedio del sitio fue de 95,1 y 91,8 kgf, para la púa Lisa y Bio1, respectivamente. Otra explicación posible es que en este sitio

se haya expresado la componente friccional del suelo, ya que los valores de adhesión estimada estuvieron cercanos a 0. Este sitio tuvo una resistencia a la penetración baja, pero una densidad aparente relativamente elevada ( $1,35 \text{ gr cm}^{-3}$ ), respecto al sitio I y III. Stafford & Tanner (1977) encontraron que la fuerza friccional se incrementa a medida que también lo hace la densidad aparente del suelo. Posiblemente los resultados hallados en este sitio respondan al efecto friccional más acentuado que el adhesivo.

En el sitio III la humedad media fue de 32,3 %. La adhesión estimada para la superficie Lisa fue de 3,3 kPa y 2,3 kPa para la Bio1. Estos valores permanecieron muy cerca a la adhesión estimada máxima de cada superficie. En el bloque 8, la fuerza de tracción de la púa Bio1 (107,6 kgf) fue sensiblemente superior al resto de los bloques del sitio (93,1 kgf). Este valor inusual generó que el promedio general del sitio de la púa Bio1 supere al de la púa Lisa. Este sitio se ubica en una posición baja en el relieve, generando zonas de alta humedad y además presentó una elevada resistencia a la penetración (1008 kPa) y con elevada variabilidad. En estas condiciones posiblemente la púa Bio1 haya transitado por zonas con mayor resistencia mecánica generando así una mayor demanda de tracción. Otra explicación posible es que al presentar una resistencia a la penetración superior (1008 kPa) (Tabla 7) y elevada humedad gravimétrica (32,3 %) (Tabla 4), podría estar provocando un incremento en las cargas normales sobre la púa. De ser así cobraría mayor relevancia la componente friccional de la resistencia al deslizamiento y explicaría porque la superficie Lisa demandó menor fuerza de tracción en estas condiciones. Sería interesante realizar futuras investigaciones sobre estos resultados y conocer si hay interacción entre las cargas normales y la superficie de los órganos de remoción. Stafford & Tanner (1977), informaron que la adhesión aumentó con la mayor densidad aparente, causada por cargas normales más altas, ya que se incrementa el número de partículas que tienen contacto con la superficie. Ellos encontraron un ajuste lineal entre la adhesión y la

densidad aparente, en un rango entre 1,8 y 2,2 gr cm<sup>-3</sup>. El rango de densidades en este ensayo es menor (1,2 – 1,4 gr cm<sup>-3</sup>) pero es esperable encontrar similares resultados a los descriptos. Sin embargo, no existe evidencia en un comportamiento diferencial en función de la variación de la superficie.

Los valores más elevados de adhesión hallados con la superficie Lisa, generaron que se adhiriera una mayor cantidad de suelo sobre la superficie de la púa provocando un reemplazo de la fricción suelo-metal por la fricción suelo-suelo, como manifestó Gill & Vanden Berg (1968). Esta última es más elevada, provocando así, un incremento en la resistencia al deslizamiento. De cierta manera, puede mencionarse una influencia recíproca entre los componentes adhesivo y friccional. Es decir que, si la adhesión aumenta, se adhiere mayor cantidad de suelo sobre el metal, y la fricción se incrementa, por la tanto la fuerza de tracción aumenta.



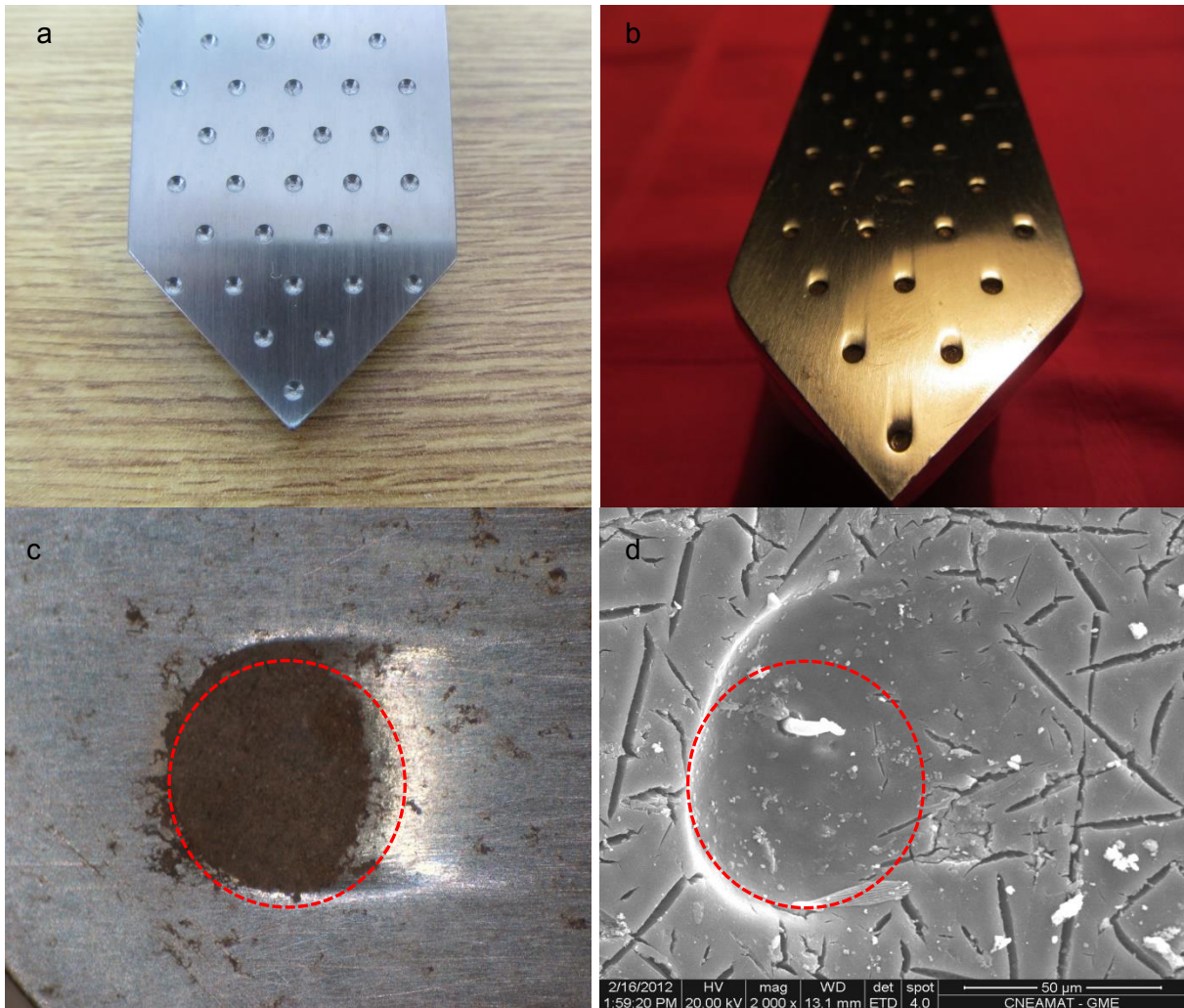
**Figura 28:** Adhesión normal (kPa) y Fuerza de tracción (kgf) en función de la humedad gravimétrica del suelo para las dos superficies metálicas: Lisa y bio1: Referencias: Adhesión esperada Bio1) Valores estimados de la relación estadística entre la adhesión y humedad (%) a través de una función polinómica de tercer grado; Adhesión esperada Lisa) Valores estimados de la relación estadística entre la adhesión y humedad (%) a través de una función polinómica de tercer grado; Fuerza de tracción Lisa) Valores observados de la fuerza de tracción a campo; Fuerza de tracción Bio1) Valores observados de la fuerza de tracción con la superficie Bio1. Números romanos corresponden a los sitios.

Por último, en el sitio IV, la componente de la resistencia al deslizamiento de la púa fue exclusivamente friccional, ya que la humedad media del sitio fue del 25,8 % y con este valor la adhesión estimada es nula para ambas superficies. En esta oportunidad la fuerza de tracción de la púa con la superficie Lisa fue superior respecto a la Bio1 en los tres bloques del sitio. La fuerza de tracción media fue la más alta de todos los sitios, en ambas púas, ya que para la púa Lisa se obtuvo una fuerza media de 106,6 kgf y para la Bio1 el valor fue de 101,9 kgf. A partir de estos resultados puede inferirse que la modificación de la superficie de la púa, a través de la incorporación de cavidades, no solo influye sobre la componente adhesiva de la resistencia al deslizamiento, sino que también lo hace sobre la componente friccional. Tong et al., (2012), expresaron que la presencia de domos convexos sobre la superficie reduce el desgaste de los domos distales debido a un efecto guía, por lo tanto, la fricción no se distribuye homogéneamente y por consecuencia el desgaste es desigual. Es decir que, a través del desgaste observado, puede inferirse que la presencia de los domos tuvo una incidencia sobre el flujo friccional del suelo.

Si se observan las cavidades de la púa, luego de ser utilizadas en el ensayo, es decir cuando ya actuó el desgaste abrasivo, puede evidenciarse que comenzaron a perder su forma semiesférica (Figura 29a) y se nota la formación de una hendidura contigua a la semiesfera (Figura 29b). Posiblemente esto indique la presencia de un flujo preferencial de circulación del suelo. La Figura 29c representa en detalle la forma de la cavidad desgastada y se puede asemejar a la estructura "tipo cometa", la cual coincide con las geometrías mecanizadas sobre un arado y evaluadas por Zhu et al., (1992). En la Figura 29d, en escala micro, puede apreciarse la geometría de la cavidad del Bicho torito, la cual no es semiesférica y se asemeja a la forma de la cavidad bajo desgaste abrasivo. Sería interesante en futuras investigaciones, caracterizar la geometría definitiva luego de un desgaste considerable, para realizar un nuevo diseño y mecanizarlo sobre una púa. Es



esperable que mejore el rendimiento energético de la púa, ya que además de mejorar la componente adhesiva de la resistencia al deslizamiento, se estaría actuando sobre la friccional, favoreciendo de una manera más acentuada el flujo preferencial de circulación del suelo.



**Figura 29:** a) Fotografía de las cavidades de la púa antes de usarlas en el ensayo. b) Fotografía de las cavidades de la púa luego de utilizarse en el ensayo. c) Fotografía en detalle de la cavidad desgastada con la forma “tipo cometa”. d) Fotografía de microscopía electrónica del detalle de la cavidad en el Bicho Torito.

Las fuerzas representadas en la ecuación 2 que actúan en la interfaz suelo/metal permiten deducir la ponderación que ocupa la adhesión dentro del resto de los componentes

involucrados. Es así, que los resultados obtenidos demuestran que una disminución de la adhesión del orden del 45 % encontrada con la superficie Bio1 respecto a la superficie Lisa, provocó que la demanda de fuerza de tracción disminuya un 4 %. Esta diferencia fue estadísticamente significativa. En ensayos realizados con anterioridad se alcanzó una diferencia de alrededor del 7% (datos no publicados). Los antecedentes mencionados en este trabajo expresan haber alcanzado variaciones del orden del 12 %, pero empleando canales edafométricos, es decir en condiciones ambientales más controladas. Por lo tanto, es probable que, si las pruebas se realizaran en suelos con mayor contenido de arcilla y con mayor índice de plasticidad, puedan alcanzarse valores más altos de eficiencia energética con superficies biomiméticas.

## 6. CONSIDERACIONES FINALES

A partir de los resultados del presente trabajo, fue posible corroborar que la reducción en la resistencia al deslizamiento, medida a través de la fuerza de tracción de las púas, encontrada con la superficie Bio1 respecto a la superficie Lisa se debió a una modificación en el valor de adhesión entre el suelo y el metal. Es probable que, esta modificación de la superficie de contacto con el suelo, también produzca una alteración en el efecto friccional que es el otro componente de la resistencia al deslizamiento. Por lo tanto, para incrementar la magnitud del efecto sobre la demanda energética de órganos de remoción de suelo es recomendable direccionar la obtención de datos incluyendo el análisis dinámico y sus efectos friccionales de las superficies biomiméticas.

Las investigaciones futuras deberían orientarse a reducir aún más la fuerza de tracción para disminuir la demanda energética de órganos de remoción de suelo. Una alternativa para incrementar este efecto es emplear micro y nano-topografías. La naturaleza utiliza estructuras jerárquicas para aumentar la propiedad funcional. Simultáneamente sería conveniente emplear tratamientos superficiales que endurezcan la superficie para garantizar su durabilidad en un ambiente agresivo como lo es el suelo. Existen numerosas microtopografías que pueden ser investigadas y el campo de los materiales biológicos es una rama en pleno crecimiento dentro de la ingeniería de los materiales. Estas microtopografías pueden mecanizarse sobre materiales a través de métodos interferométricos con láseres de alta potencia y son útiles para “grabar” patrones periódicos en la superficie del material.

Otra ventaja que podría esperarse al modificar la adhesión del suelo sobre los órganos es la ampliación de la ventana temporal de utilización de los implementos y la

posibilidad de que puedan emplearse en otras condiciones de trabajo (mayor aproximación entre órganos, condiciones de suelo desfavorables, etc.).

En la actualidad, en coyunturas de reducción del consumo de combustible fósil, en el contexto de cambio climático, existe una presión cada vez más alta para diseñar tecnologías que mejoren la eficiencia energética, de distintos procesos involucrados en la producción. En máquinas y herramientas que estén en contacto con el suelo aún no se detectan productos tecnológicos que surjan a partir de la biomimética, ya que gran parte de los desarrollos se encuentran aún en etapas de investigación. No obstante, representa un área que registra varias patentes, por lo que indudablemente posibilitará el impulso de innovaciones en el campo de las tecnologías agrícolas.

## **7. CONCLUSIONES**

La modificación de la superficie metálica, a través de la incorporación de cavidades semiesféricas, provocó una reducción en la adhesión normal del suelo sobre el metal y fue influenciada por la humedad gravimétrica.

En las condiciones de suelo ensayadas, la reducción de la adhesión normal del suelo, lograda a través de la incorporación de cavidades semiesféricas en la superficie de contacto de la púa de un escarificador de arco rígido, se manifestó como una disminución en la demanda de tracción.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

**Allison, L.E., L. Bernstein, C.A. Bower, J.W. Brown, M. Fireman, J.T. Hatcher, H.E. Hayward, G.A. Pearson, R.C. Reeve, L.A. Richards & L.V. Wilcox.** 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook 60.

**Ashburner, J.E. & B.S. Sims.**1984. Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. Ed. San José, Costa Rica. 474 pp.

**Atterberg, A.** 1911. Die Plastizität der Tone. Internationale Mitteilungen fuer Bodenkunde 1, 10-43.

**Azadegan, B. & J. Massah.** 2012. Effect of temperature on adhesion of clay soil to steel. Cercetari Agronomice in Moldova 150: 21-27.

**Bar-Cohen, Y.** 2006. Biomimetics using nature to inspire human innovation. Bioinspiration & Biomimetics 1: 1-12.

**Barthlott, W.** 1998. Self-Cleaning surfaces of objects and process for producing same: US 6660363 B1. USPTO, Alexandria. 4 pp.

**Bhushan, B.** 2009. Biomimetics: lessons from nature: an overview. Philosophical Transactions 367: 1445-1486.

**Canzian, A.M., J. Crisanti, C.A. Monti, E.A. Favret, H.J.M. Morras, A. Romito, M.A. Roba, J.P. D'Amico & M.O. Tesouro.** 2014. Surface topography of agricultural machinery tools that interact with the soil and agricultural tool with modified surface topography: US 20140102738 A1. USPTO, Alexandria. 11 pp.

**Chancellor, W.J.** 1994. Friction between soil and equipment materials- review: ASAE Paper: 94-1034. Meeting of American Society of Agricultural Engineers. ASAE, St. Joseph.

**Cong, Q., L. Ren, B. Chen, & F. Su.** 1990. A study on adhesion reducing methods of terrain-machine. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 6: 8-14.

**De Guire, E.** 2011. DLC coatings reduce plowshare friction in soil. The American Ceramic Society, Ohio. Disponible en línea en: <http://ceramics.org/ceramic-tech-today/dlc-coatings-reduce-plowshare-friction-in-soil> Último acceso 09 de Sep. de 2014.

**DuraMaxx.** 2014 plough bodies for all soil conditions: Safe to use and cost-effective on all soils. Lemken, Norfolk. Disponible en línea en: <http://lemken.com/en/products/ploughing/duramaxx> Último acceso 27 de Nov. 2014

**Favret, E.A.** 2008. La biología inspira nuevos desarrollos tecnológicos en el campo de la ciencia de los materiales y la ingeniería. Revista de la Sociedad Argentina de Materiales 5: 2-13.

**Favret, E.A.** 2014. Caracterización de la epidermis del *Diloboderus abderus* (hembra) para el desarrollo de herramientas biomiméticas. 3º Congreso Argentino de Microscopía SAMIC

2014. Mza. Disponible en línea en: <http://samic-argentina.org/PDF/Materiales/Favret%20E.pdf>  
Consulta 3 de mayo de 2017.

**Fontaine, E.R.** 1954. Investigations into the mechanism of soil adhesion. *Journal of Soil Science* 5: 251-263.

**Fukagawa, R., T. Tamai, K. Tateyama & H. Takahashi.** 2002. Basic properties of adhesion between clays and solid surfaces. *Geotechnical engineering and transportation: proceedings: 2nd World Engineering Congress: engineering innovation and sustainability: global challenges and issues.* University Putra Malaysia, Selangor. pp 3-9.

**Godwin, R.J.** 2006. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil & Tillage Research* 97 (2007) 331–340.

**Gomez, L.A.** 1993. Carta básica semidetallada de suelos. Complejo de Investigaciones Castelar. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pcia. de Buenos Aires. Castelar INTA Ediciones.

**Gill, W.R. & G.E. Vanden Berg.** 1968. Soil dynamics in tillage and traction. *Agricultural Research Service, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.* 210 pp.

**Guo, P. & J. Liu.** 1995. The effect of magnetized plowshare upon tillage performance. *Agricultural Research in the Afrid Areas* 13: 103-109.

**Jia, X., L. Ren, B. Chen, J. Tong & Q. Cong.** 1995. Affects of soil animal's unsmoothed cuticles on the wettability of the cuticles. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 11(4):1-4.

**Jia, X., L. Ren & B. Chen.** 1996. Wettability of unsmoothed surfaces of soil animals' cuticles and bionic composite coatings. *Chinese Journal of Materials Research* 10(5): 556-560.

**Kverneland Soil Equipment.** 2015. Kverneland Group. Disponible en línea en: <http://dc.kvernelandgroup.com/irj/portal/anonymous?NavigationTarget=navurl://9e69cfa05f52c6ce3d1acace0a5b6432> Último acceso 12 de agosto de 2015.

**Han, G. & Y. Zhang.** 1991. Measurement and analysis of ploughing resistance on the magnetic plough. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Machinery* 22 (3):25-28.

**Harsono, S.** 2011. Tillage implement effects on wet sticky soil. *Research Journal of Agricultural Science* 43 (4).

**Hendrick, J.G. & A.C. Bailey.** 1982. Determining components of soil-metal sliding resistance. *Transactions of the ASAE*, 25(4): 845-849.

**Horner, M.** 2011. DLC-coated plows to conserve fuel. *Advanced Coatings & Surface Technology*, Sept. 2011, p. 11. Gale Academic OneFile. Último acceso 20 de febrero de 2020.

**IRAM 4537.** Símbolos de rugosidad de superficies. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

**IRAM 10513.** Suelos disturbados. Método manual p/ la determinación del límite líquido. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

**IRAM 10502.** Mecánica de suelos. Método de determinación del límite plástico e índice de plasticidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

**Lemken.** 2016 The agrovion company. Ploughing. Alpen. <https://lemken.com/en/soil-cultivation/ploughing/> Ultimo acceso 12 de noviembre de 2014

**Li, J., L. Ren, B. Chen & W. Gu.** 1993a. A study on the soil adhesion characteristics of 35 steel. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 9: 19-25.

**Li, J., L. Ren, B. Chen & W. Gu.** 1993b. The effect of microstructure of steel on soil adhesion characteristics. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 9: 14-21.

**Li J., L. Ren & B. Chen.** 1995. The statistics analysis and mathematical analogy of the unsmoothed geometrical units on the surface of soil animal. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 11(2): 1-5.

**Li, J., L. Ren, B. Chen & M. Jiang.** 1996. Study on surface characteristics of material of plough moldboard and their effects on soil adhesion. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 12: 45-48.

**Pozzato, S., D. Zilio, G. Fois, D. Vendramin, G. Mistura, M. Belotti, Y. Cheng & M. Natali.** 2006. Superhydrophobic surfaces fabricated by nanoimprint lithography, Microelectronic Engineering 83: 884-888.

**Qaisrani, A.R., B. Chen & L. Ren.** 1992. Modified and unsmoothed plow surfaces-a means to reduce plowing resistance. International Agricultural Engineering Journal 1(3): 115-124.

**Qaisrani, A.R., J. Tong, L. Ren & B. Chen.** 1993. The effects of unsmoothed surfaces on soil adhesion and draft of bulldozing plates. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 9(1): 7-13.

**Qian, D.H. & J.X. Zhang.** 1984. Research on adhesion and friction of soil against metallic materials. Acta Agromechanica 15: 70-78.

**Ren, L., J. Tong, B. Chen & L. Wu.** 1990. Thermodynamic analyses of behavior of soil solid surface adhesion. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 6(4): 7-12.

**Ren, L., J. Tong, J. Li & B. Chen.** 2001. Soil Adhesion and Biomimetics of soil engagin components: a Review. Journal of Agricultural Engineering Research 79: 239-263.

**Ren, L., Z. Han, J. Li & J. Ton.** 2006. Experimental Investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction. Soil & Tillage Research 85: 1-12.

**Ren, L.Q.** 2009. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines. Science in China Series E: Technological Sciences 52 (2):273-284.



- Salokhe, V.M. & D. Gee-Clough.** 1988. Coating of cage wheel lugs to reduce soil adhesion. *Journal Agricultural Engineering Research* 41: 201-220.
- Salokhe, V.M. & D. Gee-Clough.** 1989. Applications of enamel coating coating in agricultural. *Journal of Terramechanics* 26: 275-286.
- Salokhe, V.M. Gee-Clough, D. Manzoor, S. & K.K. Singh.** 1990. Improvement of the tractive performance of cage wheel lugs by enamel coating. *Journal of Agricultural Engineering Research* 45: 209-224.
- Salokhe, V.M., M. Koki & K. Sato.** 1993. Why does soil not stick to enamel coating?. *Journal of Terramechanics* 30: 275-283.
- Satomi, T., H. Nihei & H. Takahashi.** 2012. Investigation on characteristics of soil adhesion to metallic material surface and soil animal's cuticle. 15<sup>th</sup> International Conference on Experimental Mechanics. Faculty of Engineering University of Porto; Portuguese Society for Experimental Mechanics, Porto. 9 pp.
- Smith, P., M. Bustamante, H. Ahammad.** 2014. Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, & J.C. Minx, (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, and New York, NY, 811–922 pp.
- Soni, P. & V. Salokhe.** 2006. Theoretical analysis of microscopic forces at soil-tool interfaces: a review. *CIGR Journal: Agricultural Engineering International* 8: 25 pp.
- Srivastava, A.K., C.E. Goering & R.P. Rohrbach.** 1993. *Engineering Principles of Agricultural Machines.* ASAE, St. Joseph. 601 pp.
- Stafford, J.V. & D.W. Tanner.** 1977. The frictional characteristics of steel sliding on soil. *Journal of soil science* 28 541-553.
- Suminitrado, D. M., T. Koike, T. Konoba, S. Yuzawa & S. Kuroishil.** 1988. A mathematical model to predict the trajectory of soil motion on a moldboard plow surface. In: *Proceedings of the Second Asia-Pacific Conference of ISTVS*, pp 195-204. Bangkok, Thailand.
- Sun T., L. Feng, X. Gao & L. Jiang.** 2005. Bioinspired surfaces with special wettability, *Accounts of Chemical Research* 38: 644-652.
- Sun J.; Wang, Y.; Ma, Y.; Tong, J. y Zhang, Z.** 2018. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth  $\geq$  40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in engineering software* 119 30-37
- Tasovski, V.** 2009. Soil transport surface with anti-adhesion biomimetic features and machine using same: US 20090101370 A1. USPTO, Alexandria. 9 pp.
- Terzagui, K. & R.B. Peck.** 1958. *Mecánica de los suelos en la ingeniería práctica.* El Ateneo, Bs. As. 681 pp.

**Tesouro, M.O., J.M. Ferreira, M.A. Roba, O.E. Neiman & A. Romito.** 2014. Evaluación de distintos diseños de púas de escarificadores de arco rígido para un escarificador de labranza en franjas. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pcia. de Buenos Aires. Castelar INTA Ediciones.

**Tesouro, M.O., L. Venturelli, M.A. Roba, A. Romito, L.M. Setten & E.A. Favret.** 2018. How to improve soil anti-adhesion by studying de micro-topography of a beetle cuticle. *Microsc. Microanal.* 24 (Suppl 1).

**Tong, J., L. Ren, B. Chen & A.R. Qaisrani.** 1994a. Characteristics of adhesion between soil and solid surfaces. *Journal of Terramechanics* 31 (2): 93-105.

**Tong, J., L. Ren & B. Chen.** 1994b. Geometrical morphology, chemical constitution and wettability of body surfaces of soil animals. *International Agricultural Engineering Journal* 3 (1-2): 59-68.

**Tong, J., X.Y. Wang, J.L. Yan, Z.W. Han & L.Q. Ren.** 2000. Effects of magnetic-field upon soil adhesion and friction. *Proceedings of International Agriculture Engineering Conference.* ASABE; AAAE, Bangkok. pp. 66-72.

**Tong, J., B. Z. Moayad, M.Y. Hai, J.Y. Sun, D.H. Chen, H.L. Jia, & L.Q. Ren.** 2009. Effects of Biomimetic Surface Designs on Furrow Opener Performance. *Journal of Bionic Engineering* 6 (3): 280–89.

**Tong, J., Z. Zhang, Y. Ma, D. Chen, B. Jia & C. Menon.** 2012. Abrasive wear of embossed surfaces with convex domes. *Wear* 274– 275 (2012) 196– 202

**Tong, J., Q. Zhang, L. Guo, Y. Chang, Y. Guo, F. Zhu, D. Chen & X. Liu.** 2015. Compaction Performance of biomimetic press roller to soil. *Journal of Bionic Engineering.* 12: 152-159.

**Vermeulen, G.D., J.J. Klooster, M.C. Sprong & B R. Verwijs.** 1997. Effect of straight and spiral sugar beet extraction paths and lift acceleration on soil tare and relative soil adherence. *Journal of Agricultural Science.* 45:163-169.

**Vinogradov, V. I. & M. D. Podskrebko,** 1962. Study of the influence of speed of movement of a wedge on the magnitude of normal and tangencial forces acting on its surfaces. Chelyabinsk Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, Chelyabinsk. pp. 66-73.

**Zeng, D.** 1995. The dynamics of mechanical-edaphic system. *Agricultural Handbook.* Science and Technology Press, Beijing.

**Zhu, H., L. Tan, & S. Wu.** 1992. An experimental study on the comet type passage-holes plough reducing resistance. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery* 23: 20-24.